



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Programa de Maestría y Doctorado en Música

Facultad de Música  
Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología  
Instituto de Investigaciones Antropológicas

Exploración de la Emergencia de Morfológicas  
Temporales desde los Dominios Sonoros.

TESIS  
PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
DOCTOR EN MÚSICA (Tecnología Musical)

PRESENTA

Carlos Tardío Pi

TUTOR

Pablo Padilla Longoria (IIMAS-UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Ruben Yvan Maarten Fossion (ICN-UNAM, C3-UNAM)  
Roberto Morales Manzanares (FaM-UNAM)

CIUDAD DE MÉXICO. DICIEMBRE 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de obras elaboradas por otros autores, o sus referencias, aparecen aquí debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante las convenciones editoriales correspondientes.*

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal line at the bottom.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE MÚSICA

Tesis para optar al grado de

Doctor en Música (Tecnología Musical)

---

# Exploración de la Emergencia de Morfologías Temporales desde los Dominios Sonoros

---

por

Carles Tardío Pi

Tutor: Pablo Padilla

Abril 2020



# Resumen

Partiendo de la premisa de que un sujeto cognoscente es capaz de percibir las propiedades de emergencia y auto-organización que se manifiestan en determinados sistemas complejos dentro del ámbito de los fenómenos sonoros y vibratorios, en esta tesis se exploran diferentes posibilidades para poder conceptualizar y describir dichas propiedades. Para ello se adopta tanto una perspectiva tanto teórica, mediante el uso de herramientas matemáticas pertenecientes a las series de tiempo y de los formalismos entrópicos, como desde una perspectiva experimental, a partir del análisis de las señales y de su transformación a los dominios sonoros en diferentes sistemas naturales, los cuales clasificamos en tres escalas de descripción espacial.

Así dentro la escala microscópica se estudia primeramente el uso de las propiedades oscilatorias de sincronización en construcciones genéticas dentro del campo de la biología sintética, enfocadas a la implementación y al diseño de interacciones sónicas en modelos de computación no convencional en sistemas híbridos bactoelectrónicos. Dentro del campo de la microbiología se estudian las posibilidades comunicacionales y de organización en colonias de bacterias durante su crecimiento y en las transiciones de morfotipo mediante el análisis de vibraciones y de emisiones acústicas. En la escala mesoscópica se investigan los fenómenos de quimeras acústicas en sistemas mecánicos y se propone una instalación sonora compuesta por un sistema de metrónomos acoplados entre sí. Finalmente dentro de la escala macroscópica se investigan las oscilaciones bariónicas acústicas como un principio fundamental de carácter vibratorio para el surgimiento y organización de las macroestructuras cosmológicas del Universo actual.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

Primero de todo agradecer a mi tutor Pablo Padilla, por tener la calma de escucharme y acompañarme a lo largo de esta tesis y por los lindos cafés compartidos en Coyoacán. Igualmente agradecer a mis cotutores Ruben Fossion y Roberto Morales, y a mis lectores de tesis Rossana Lara, Rafael Peña-Miller y Felipe Orduña.

Otro agradecimiento va para la Facultad de Música y al Programa de Posgrado de la UNAM, por la Beca PAEP para la estancia en la Cambridge University. Al CONACYT por la Beca Nacional de Doctorado, y por la Beca de Movilidad Internacional para la estancia en la P. Universidad Católica de Chile.

Igualmente agradecer al IIMAS, al C3, al ICAT y al CCG del la UNAM por ofrecerme un espacio de trabajo.

Agradecer a Juan Keymer y a Janneke Noorlag por recibirme en el KeymerLAB. A Rafael por abrirme las puertas del Departamento de Biología Sintética y Biología de Sistemas, y por este aprender compartiendo y en la dispersión del imaginar. Igualmente un agradecimiento a la gente del CCG: Ayari, Daniela, Sandra, David y Charly, por tener la paciencia de enseñarme desde cero como se hacen las cosas en un lab.

Als meus pares i germans, als meus avis. A tota la gent de Montcada que apareix i desapareix en les distàncies però sempre està.

A Lina, Mariana y Xavi, a la banda del Espectro Electromagnético, Los 14, a las Hervideras, al Ollín, carnal de friteras con La Virgen del Plug y a la banda de la montaña de Ocotitlán. A Interspecifics.

Al “trueno peinado” de Borges y a los Ultra e InfraShows de Miguel Noguera.

Finalmente al Recolectivo de Irrealidad y a las criaturas del

$$\triangle = \{\text{Idalid, Lava, Nat}\}.$$

“[...]”

Space is a swarming in the eyes; and time,

A singing in the ears. [...]”

*Pale Fire*, Vladimir Nabokov.

“[...]”

Cuántas veces me he dicho:

¿Seré yo esa piedra?

[...]”

*Comunión Plenaria*, Oliverio Girondo.

“ Colorless green ideas sleep furiously. ”

*Syntactic Structures*, Noam Chomsky.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Contenidos</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Introducción Literaria</b>	<b>1</b>
<b>Introducción Narrativa</b>	<b>7</b>
<b>1. Hacia una Exploración de la Emergencia en Sistemas Complejos desde los Dominios Sonoros</b>	<b>13</b>
1.1. Comportamientos y Propiedades Emergentes y de Auto-Organización en Sistemas Complejos . . . . .	15
1.2. Propiedades Sonoras y Auditivas . . . . .	18
1.3. Categorías Sonoras . . . . .	19
1.4. Estructuras y Patrones Sonoros . . . . .	24
1.5. Medidas de Complejidad Sonora . . . . .	39
1.6. Auto-semejanza Temporal y Ruido Fractal . . . . .	51
1.7. Correlaciones y Transiciones de Fase . . . . .	56
1.8. Termodinámica del Sonido y Entropía Vibracional . . . . .	65



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

1.9. Estadísticas y Leyes de Escala en el Dominio Musical . . . . .	72
1.10. Síntesis Experimental de Ruidos y Procesos Estocásticos . . . . .	77
1.10.1. Ruidos No-Convencionales . . . . .	78
1.10.2. Unconventional Stochastic Sounds . . . . .	81
1.10.3. Complexity Interpolator . . . . .	89
<b>2. Diseño de Interacciones Sónicas en Sistemas de BactoComputación</b>	<b>98</b>
2.1. Génesis Clásica y Futuros No Convencionales en Computación . . . . .	101
2.2. Génesis Clásica y Futuros No Convencionales en Computación Musical . .	106
2.3. BioComputación y BactoComputación . . . . .	109
2.3.1. Información Genética . . . . .	111
2.3.2. Osciladores Biológicos Sintéticos . . . . .	115
2.3.3. Quorum Sincronizado de Relojes Genéticos . . . . .	117
2.4. Síntesis Híbrida en Sistemas BactoElectrónicos . . . . .	124
2.4.1. Sonificación DSP . . . . .	127
2.4.2. Sistema Básico de <i>Voltage Controlled BactoOscilator</i> . . . . .	130
2.4.3. Sistema Extendido de <i>Voltage Controlled BactoOscilator</i> . . . . .	133
2.4.4. Modulador de Frecuencia Optogenético Ajustable . . . . .	136
2.4.5. Electromicrobiología Sintética y Osciladores Bacterianos Electrónicos	139
2.5. Frentes de Sincronización en un Sistema Espacialmente Extendido de van der Pol . . . . .	143
2.5.1. Solución de Onda Viajera a la Ecuación Modificada del Oscilador de van der Pol . . . . .	144
2.5.2. Simulación Numérica Mediante el Método de Diferencias Finitas . .	149
2.5.3. Código Python del Método de Diferencias Finitas . . . . .	154
2.6. Instalación AudioVisual: Biopixel Array . . . . .	159
<b>3. Comunicaciones Vibracionales en Bacterias: Morfologías de Crecimiento y Transiciones de Morfotipo</b>	<b>166</b>

3.1. Motivación para el Estudio de la Auto-Organización en Colonias de Bacterias	170
3.1.1. Patrones de Crecimiento Difusivo en Sistemas No Vivos . . . . .	175
3.1.2. Patrones Complejos en Colonias de Bacterias . . . . .	179
3.1.3. Diagramas Morfológicos en Colonias de Bacterias . . . . .	181
3.1.4. Quiralidad y Transiciones de Morfotipo $\mathcal{T} \rightleftharpoons \mathcal{C}$ . . . . .	185
3.1.5. Comunicaciones Bioquímicas y Físicas en Bacterias . . . . .	190
3.2. Comunicaciones Acústicas y Vibracionales . . . . .	192
3.2.1. Análisis de los Estudios de Emisión y Respuesta Sonora en Colonias de Bacterias . . . . .	195
3.2.2. Comunicación Sonora y Movimientos Intracelulares . . . . .	200
3.3. Experimentos de Mediciones Acústicas en Colonias de <i>P. Dendritiformis</i> .	204
3.3.1. Materiales, Métodos y Diseño Experimental . . . . .	204
3.3.2. Resultados . . . . .	208
3.3.3. Discusión . . . . .	214
3.3.4. Modelos Acústicos en Bacterias . . . . .	218
3.3.5. Conclusiones . . . . .	231
3.4. Proyecto <i>Comunicaciones Especulativas</i> . . . . .	234
3.4.1. Descripción del Sistema . . . . .	235
3.4.2. Retroalimentación del Sistema . . . . .	240
<b>4. Especulaciones Acústicas: Quimeras Mecánicas y Oscilaciones Barióni-</b>	
<b>cas</b>	<b>244</b>
4.1. Quimeras Acústicas en un Sistema de Metrónomos Acoplados . . . . .	245
4.1.1. Quimeras Mecánicas Mínimas . . . . .	246
4.1.2. Instalación Sonora de Quimeras Acústicas . . . . .	248
4.1.3. Simulaciones Numéricas de Péndulos Acoplados . . . . .	251
4.2. Oscilaciones Bariónicas Acústicas . . . . .	256
4.2.1. Radiación de Fondo Microondas . . . . .	260

4.2.2.	Anisotropías en la Radiación de Fondo Microondas . . . . .	262
4.2.3.	Picos Acústicos . . . . .	265
4.2.4.	Oscilación Acústica Idealizada . . . . .	270
4.3.	Especulaciones Híbridas: Quimeras Cosmológicas . . . . .	277
4.3.1.	Osciladores Cuánticos Acoplados . . . . .	279
4.3.2.	Caso $N=3$ . . . . .	282
4.3.3.	Quimeras Cuánticas . . . . .	285
4.3.4.	Fluctuaciones Cuánticas . . . . .	289
4.3.5.	Fluctuaciones Inflacionarias . . . . .	297
4.3.6.	Inflatones Quimera . . . . .	304
<b>5.</b>	<b>Observaciones Finales</b>	<b>316</b>
5.1.	<i>Conclusiones Finales</i> . . . . .	331
	<b>Cloenda Poética</b>	<b>360</b>
<b>A.</b>	<b>Anexo Capítulo 1</b>	<b>370</b>
A.1.	Generación de Ruidos y de Funciones de Auto-Correlación . . . . .	370
A.2.	Unconventional Stochastic Sounds . . . . .	377
A.3.	Complexity Interpolator . . . . .	397
<b>B.</b>	<b>Anexo Capítulo 2</b>	<b>406</b>
B.1.	Teoría AR . . . . .	406
B.2.	Representación . . . . .	407
B.3.	Ciclo de Computación . . . . .	409
<b>C.</b>	<b>Anexo Capítulo 3</b>	<b>411</b>
C.1.	Emisiones Acústicas - Correlación Cruzada Entre Días, (T-test) . . . . .	411

---

C.2. “A 3D printable device for spatio-temporal quantification of fluorescently-tagged bacteria in spatially-explicit environments” . . . . .	447
C.3. Estímulos Sonoros con Ruido Blanco . . . . .	447
<b>D. Anexo Capítulo 4</b>	<b>454</b>
D.1. Código de Simulación Numérica de Péndulos ( <b>Processing</b> ) y Sonificación Metrónomos (PD) . . . . .	454
D.2. Estado Fundamental Oscilador Harmónico Cuántico Acoplado $N = 2$ . . .	472
 <b>Bibliografía</b>	 <b>477</b>

# Índice de figuras

1.1. Grabado en un templo jainista de la India. “It is impossible to properly understand an entity consisting of infinite properties without the method of modal description consisting of all viewpoints, since it will otherwise lead to a situation of seizing mere sprouts (i.e., a superficial, inadequate cognition), on the maxim of the blind (men) and the elephant.” Mallisena [1]. . . . .	14
1.2. Función sinusoidal, percibida geoméricamente a través de una representación experimental y a partir de su descripción matemática. . . . .	19
1.3. Mapa de sonidos del día a día. Dentro de cada sección se muestran en negrita los eventos productores de sonido, y sus atributos relevantes en itálica. La complejidad va en aumento hacia el centro de la figura, donde se muestran ejemplos de sonidos con patrones temporales, compuestos y híbridos. Las palabras asociadas a un signo de interrogación corresponden a categorías o atributos aún bajo cuestionamiento. . . . .	21
1.4. Propiedades mecánicas y de propagación de ondas de vibración longitudinales y transversales en telarañas. En experimentos se utilizan métodos de interferometría láser Doppler para determinar las correlaciones presentes entre la presión de la seda y la velocidad del sonido en ésta [36]. . . . .	23
1.5. Dunas de arena en el planeta Marte. Diferencias en la velocidad del viento, la gravedad y la presión atmosférica pueden generar diferentes formas en las dunas. . . . .	25

1.6. Piedra del Sol o Calendario Azteca. Se puede observar aparte de la simetría rotacional, la simetría especular que parte del centro de la cara de Tonatiuh, dios náhuatl del Sol. . . . .	26
1.7. Algoritmo de paisaje fractal. La idea detrás del algoritmo de sub-división espacial es sencilla, considerando un plano $x - y$ : (i) dividir el cuadrado en una retícula de $2x2$ , (ii) perturbar verticalmente cada uno de los 5 nuevos vértices una cantidad aleatoria, (iii) repetir este proceso en cada uno de los nuevos cuadrados decreciendo la perturbación en cada iteración. <a href="http://paulbourke.net/fractals/noise/">http://paulbourke.net/fractals/noise/</a> . . . . .	28
1.8. Autómata Celular (CA) Asíncrono tipo planta acuática. Un CA elemental es un CA binario uni-dimensional con comunicación entre células con primeros vecinos. Una de las maneras más sencillas de hacer de este modelo estocástico es utilizar el esquema de actualización $\alpha$ -síncrono; éste actualiza la célula con una probabilidad $\alpha$ y mantiene su estado con probabilidad $1 - \alpha$ . Este CA en particular está construido a través de la Regla CA 148 [44]. . . . .	29
1.9. Superficies aleatorias. O. Bernardi, et.al. [45] demuestran como superficies aleatorias como estas se puede utilizar para revelar patrones universales profundos. . . . .	30
1.10. Figura del libro <i>On Growth and Form</i> . Libro fundacional de la disciplina de las biomatemáticas que ha inspirado a científicos, artistas y pensadores tales como Alan Turing, C H Waddington, Claude Lévi Strauss, Norbert Wiener, Henry Moore y Mies van der Rohe. . . . .	32
1.11. Game of Life de John Horton Conway. Un autómata celular es una pequeña máquina con grupos de células que evolucionan iteración tras iteración transformándose y cambiando de forma según reglas de nacimiento, muerte y supervivencia deterministas. Life se juega en una retícula donde las células proliferantes se asemejan a microorganismos vistos bajo un microscopio. . .	33

- 
- 1.12. Experimentos recientes ent orno al aplauso en colectivos. En este estudio [51] se muestra que en grupos (de dos a pocos centenares de personas) siempre se incrementa la frecuencia del aplauso y que en grupos mayores ésta incrementa más rápido. A partir de un modelo basado en un oscilador acoplado se recuperan las características experimentales en las que el incremento de la frecuencia está guiado por pequeños errores de temporalidad en los individuos y por las interacciones inter-individuales que ocurren para mantener el unísono. . . . . 35
- 1.13. Sincronización en cantos de grillos. Las frecuencias normalmente pueden abarcar de 1 a 2 kHz hasta el rango ultrasónico y las señales pueden ser de banda ancha (*Katydid*s) o enmarcarse dentro de bandas de frecuencia más estrechas (la mayoría de grillos). La ventaja selectiva de utilizar uno u otro mecanismo para la transmisión y recepción de una señal en un ambiente con ruido se ha descrito en otros estudios [60]. . . . . 36
- 1.14. Observaciones de rayos a borde de misiones espaciales. Este tipo de observaciones se describen como fenómenos en los que células de tormentas espacialmente distantes parecen “encender” destellos de rayos en secuencias temporales semi-cíclicas. El rayo que ocurre en una célula sigue de inmediato a rayos de otras células separadas por decenas o cientos de kilómetros. . . . . 38
- 1.15. Datos de geo-localización de rayos provenientes del National Lightning Detection Network (NLDN) [63]. . . . . 39
- 1.16. Conceptos de orden, complejidad y diversidad entendidos a través de configuraciones espaciales en representaciones de matriz cuadradas. . . . . 43
- 1.17. Señal triangular harmónica de 200 Hz y su respectiva PSD. . . . . 47
- 1.18. UU noise. La distribución de una señal aleatoria es el set de valores posibles y sus probabilidades, en este caso la valores oscilan en el rango -1 a 1 con la misma probabilidad. . . . . 49

---

1.19. Espectro integrado del ruido UU. . . . .	50
1.20. Ruido blanco, browniano y rosado en escala log-log. . . . .	51
1.21. Helecho fractal. Intento personal del año 2002 de crear un helecho fractal (derecha) mediante un sistema de funciones iteradas (IFS) en código BASIC (centro) que reprodujera el helecho <i>Asplendium Adiantum Nigrum</i> (izquierda). . . . .	52
1.22. Figura auto-similar (similar al estilo decorativo mozárabe o a la visión en DMT) generada a través de un anidamiento de teselaciones geométricas de Kirshombille y el algoritmo Forsythia Fractal. . . . .	53
1.23. Figura auto-similar espacial de un árbol tipo Lindenmeyer System y temporal de los latidos del corazón a distintas escalas temporales [72]. . . . .	54
1.24. Función de auto-correlación en función de la lag temporal generado a través de varios sistemas electrónicos resistor-capacitor (RC) [75]. . . . .	57
1.25. Auto-correlaciones de ruidos con diferentes exponentes $\beta$ . . . . .	59
1.26. Espectrograma generado del ruido browniano, rosado, FBM y mFBM. . . . .	61
1.27. Función de auto-correlación obtenida para del ruido browniano, rosado, FBM y mFBM. . . . .	62
1.28. Función de auto-correlación con tiempos de lag propios obtenidos para del ruido browniano, rosado, FBM y mFBM. . . . .	62
1.29. Función de auto-correlación en tiempo absoluto y tiempo propio para distintas series con exponentes que varían de $\beta = 0$ a $\beta = -3$ . Aquí si se observa que $\beta = -1$ decae más lentamente que cualquier otra serie. . . . .	63
1.30. Diagrama de fase esquemático para distintos ruidos. El exponente $\beta$ opera como una especie de parámetro de control y una medida informacional relacionada con la complejidad como parámetro de orden. El ruido $1/f$ se puede ver como un punto crítico del sistema el cual maximiza la memoria, la eficiencia, la fractalidad y el contenido informacional.[73] . . . . .	64

---

1.31. Resonadores mecánicos acoplados débilmente y acoplados y excitados por fuerzas externas aleatorias no correlacionadas [85]. . . . .	67
1.32. PSD de cuatro estaciones de radio: (a) Clásica, (b) Jazz, (c) Rock y (d) Noticias, siguiendo un ordenamiento de escala similar al ruido $1/f$ . . . . .	76
1.33. Diagrama electrónico para la construcción del modelo Noise Cornucopia DIY con White Noise, Pink-ish Noise, High Pass Noise, Grainy Noise y de Random Gates ajustables. <a href="http://musicfromouterspace.com">http://musicfromouterspace.com</a> . . . . .	80
1.34. Blue Noise . . . . .	81
1.35. Brownian Noise . . . . .	81
1.36. Red Noise . . . . .	82
1.37. Pink Noise . . . . .	82
1.38. Violet Noise . . . . .	82
1.39. White Noise . . . . .	83
1.40. Fractional Gaussian Noise . . . . .	83
1.41. Multi Fractional Gaussian Noise . . . . .	83
1.42. Bessel Process . . . . .	84
1.43. Brownian Bridge Process . . . . .	84
1.44. Brownian Excursion Process . . . . .	85
1.45. Brownian Meander Process . . . . .	85
1.46. Fractional Brownian Motion . . . . .	85
1.47. Gamma Process . . . . .	86
1.48. Geometrical Brownian Motion . . . . .	86
1.49. Inverse Gaussian Process . . . . .	86
1.50. Squared Bessel Process . . . . .	87
1.51. Variance Gamma Process . . . . .	87
1.52. Wiener Process . . . . .	87
1.53. Multi Fractional Brownian Motion . . . . .	88

1.54. Detalle del sistema WaveNet de Nsynth para el aprendizaje de estructuras temporales latentes de audio. . . . .	90
1.55. <i>Samples</i> utilizados para generar las interpolaciones de sonido en NSynth. . .	91
1.56. Onda y embedding temporal de la interpolación resultante de la onda sinusoidal con la del ruido $1/f$ . . . . .	92
1.57. PSD's de la onda sinusoidal, la del ruido $1/f$ y la onda interpolada final. . .	93
1.58. Utilizando esta arquitectura el sistema es capaz de reconstruir, <i>samplear</i> e interpolar secuencias melódicas MIDI de 2 barras. . . . .	94
1.59. Algoritmo de Voss descrito por Gardner e implementado en BackJava en [100]. En nuestro caso lo implementamos en Python con 8 datos y con restricción harmónica. . . . .	95
1.60. Conjunto de MIDI's que conforman la entrada para el algoritmo MusicVAE. . . . .	95
1.61. 4 secuencias MIDI resultantes de la interpolación de las secuencias originales. Como observamos estas interpolaciones se construyen en el tiempo de manera que empiezan con la entrada de la secuencia 1 inicial transformándose progresivamente hasta la secuencia de la entrada 2. . . . .	96
1.62. Diagrama esquemático del sistema Complexity Interpolator. . . . .	96
1.63. <i>Sampleo</i> de MIDI final del sistema Complexity Interpolator en Live. . . . .	97
2.1. Máquina de Turing y arquitectura de von Neumann para un computador de uso general [106]. La Máquina de Turing es un dispositivo hipotético que manipula un conjunto de símbolos de acuerdo a un conjunto finito de reglas (según la tesis de Church-Turing una función es algorítmicamente computable si y sólo si es computable por una Máquina de Turing). La arquitectura de von Neuman se compone de una CPU y un bloque de memoria. La CPU está compuesta de una Unidad Lógica Aritmética (ALU) que realiza las operaciones esenciales, y la unidad de control que gestiona las operaciones de ALU y su interacción con la memoria. . . . .	103

- 
- 2.2. Sistemas de computación históricos en substratos no convencionales. . . . . 104
- 2.3. CSIR Mk1, primer computador orientado a generar musica. Como almacenamiento de datos principal utilizaba líneas de retardo acústico de mercurio, con una capacidad típica de 768 palabras de 20 bit. Su reloj de memoria corría a 1000 Hz, con la unidad de control sincronizada a ese reloj y tomando dos ciclos para ejecutar una instrucción. El bus transfería un bit cada vez en cada instrucción. . . . . 107
- 2.4. Interfaz gráfica del sistema Phychip de sonificación de patrones de crecimiento del moho mucilaginoso *Physarum Policephalum* desarrollado por Interspecifics. . . . . 108
- 2.5. Modelo teórico de computación análogo tanto en computadores como en bacterias. Ambos reciben un conjunto de inputs que el algoritmo procesa y finalmente transforma en salidas. Mientras que en los sistemas de cómputo los inputs/outputs son señales electrónicas, en bacterias pueden ser señales químicas, físicas y biológicas diferentes [121]. . . . . 110
- 2.6. El “dogma central” es el proceso a través del cual las instrucciones en el ADN se convierten en un producto funcional. Fue inicialmente propuesto en 1985 por Francis Crick, quien descubrió la estructura del ADN gracias a la investigación de Rosalind Franklin [133]. . . . . 113
- 2.7. Las células permiten ir más allá de los sistemas basados en circuitos lógicos, ya que los sistemas vivos se han desarrollado evolutivamente mediante procesos computacionales dispuestos a permitir a las células el procesado de información. El dogma central de la biología molecular se enfoca de una manera similar al modelo de células como circuitos lógicos ya que éste no incorpora mecanismos metabólicos o evolutivos.[121]. . . . . 114
- 2.8. Topología y modelo del Oscilador de Goodwin [141] . . . . . 116
- 2.9. Topología y modelo del Represilador [141] . . . . . 117

---

2.10. Topología y modelo de un oscilador con feedback negativo amplificado en el cual se basa el oscilador de Danino [141] . . . . .	118
2.11. Diagrama de red. El promotor luxI genera la producción de los genes luxI, aiiA y de yemGFP en tres módulos transcripcionales idénticos. LuxI produce enzimáticamente una pequeña molécula de AHL, la cual se difunde fuera de la membrana de la célula y en las células vecinas, activando el promotor luxI. AiiA regula negativamente el circuito funcionando como una proteasa para AHL.[145] . . . . .	119
2.12. Una serie de tiempo típica para las concentraciones de LuxI (cyan), AiiA (azul), AHL interna (verde), AHL externa (rojo). LuxI y AiiA se siguen uno al otro y están en anti-fase con las concentraciones de AHL externas e internas. [145] . . . . .	120
2.13. Oscilaciones de GFP en el tiempo en el sistema [145]. . . . .	121
2.14. Dispositivos de microfluídica para los experimentos de ondas sincronizadas de bacterias [145]. . . . .	122
2.15. A la izquierda, período como función de la velocidad del flujo del canal, mostrando como se puede ajustar un periodo entre 55-90 min. Derecha, período contra amplitud par experimentos en diferentes tamaños de trampas (magenta 84-90 $\mu\text{mm}$ , azul 100 $\mu\text{mm}$ ) [145]. . . . .	123
2.16. Transformación de la señal de fluorescencia a una gráfica de superficie con el índice de escala de grises de 0 a 255. . . . .	126
2.17. Resultado final de GFP, en unidades arbitrarias, a lo largo del tiempo, con su correspondiente desviación estándar. Tal como podemos observar la gráfica obtenida se corresponde con la gráfica de [145] que observamos en la figura 2.13. . . . .	127
2.18. . . . .	129
2.19. Diagrama del Voltage Controlled BactoOscillator, donde se acoplan el módulo microfluídico, fotorresistivo y de VCO. . . . .	130

---

2.20. Simulación de voltaje y frecuencia de salida del VCbO para un input de 1V, 2V, 4V de arriba a abajo. Para la simulación se utilizó el software Circuit Simulator de Falstad ( <a href="http://lushprojects.com/">http://lushprojects.com/</a> ). . . . .	132
2.21. Módulo para VCV Rack del EVEN VCO de Befaco. . . . .	134
2.22. Diagrama del circuito electrónico del EVEN VCO de Befaco. . . . .	135
2.23. Módulo de implementación de señales de OSC a CV para VCV Rack. . . . .	136
2.24. Módulo completo de implementación para el bactooscilador para VCV Rack. . . . .	136
2.25. Circuito genético del oscilador tipo Smolen, donde LuxI se coloca bajo el promotor Lux, similar al oscilador de Danino, pero donde AiiA se coloca bajo el promotor Lux-Tet, el cual se puede activar por la AHL producida por LuxI y reprimida por el represor lambda [151]. . . . .	137
2.26. Cuando se mezclan dos colonias del oscilador de Danino y del oscilador de Smolen se pueden lograr comportamientos oscilatorios de tipo pulso en las concentraciones de AiiA y AHL, los cuales se podrían aprovechar en futuras implementaciones bacteoelectrónicas para sistemas de síntesis de modulación de amplitud [151]. . . . .	138
2.27. Mecanismos potenciales para la transferencia de electrones entre microorganismos y electrodos [153]. Para el caso de nuestro VCbO el electródo estaría acoplado al VCO y finalmente a la salida de audio. . . . .	140
2.28. El uso de <i>G.Sulfurreducens</i> en dispositivos electrónicos permite medir su conductividad que es del orden de $5 \text{ mS cm}^{-1}$ , comparables a nanoestructuras sintéticas metálicas. Aparte <i>G.Sulfurreducens</i> puede conducir a distancias del orden de los centímetros, más de 1000 veces el tamaño de la bacteria en sí. [155]. . . . .	141

- 
- 2.29. Propuesta de sistema bactoelectrónico generador de oscilaciones de corriente en bacterias *G.Sulfurreducens* acoplado a un dispositivo de síntesis de audio analógico de control de voltaje. El medio, azul, en contacto con los electrodos de oro sería el encargado de transportar las concentraciones de moléculas de *quorum sensing* encargadas de generar el acoplamiento y las oscilaciones en el grupo de bacterias. . . . . 142
- 2.30. Construcción genética dentro del *chasis* de *Geobacter* donde están integradas las tres unidades transcripcionales de *quorum sensing* en el vector de expresión del gen *pilA*. . . . . 142
- 2.31. Diagrama de nuestro sistema donde se observa los osciladores discretizados acoplados a primeros vecinos. . . . . 146
- 2.32. Malla espacio-temporal, los círculos muestran puntos conectados en una ecuación de diferencias finitas. . . . . 151
- 2.33. Solución numérica obtenida en 4 pasos temporales para la ecuación de van der Pol modificada en el caso de  $\mu = 0$ . Observamos como en el paso de tiempo  $t=4$  se estabiliza la solución. . . . . 153
- 2.34. Solución numérica obtenida haciendo la malla  $\Delta t$  y  $\Delta x$  mas pequeña y una longitud en el dominio espacial de  $L = 10$  y  $\mu = 0$ . En este caso se observa como se recupera la solución sinusoidal que habíamos obtenido analíticamente. Se puede observar en los extremos  $x = 0$  y  $x = 10$  una pequeña perturbación correspondiente a la condición de frontera con extremos fijos. 154
- 2.35. Solución numérica obtenida con diferentes valores de  $\mu$ . En amarillo  $\mu = 2$ , en azul  $\mu = \sqrt{2}$  y en rojo  $\mu = 0$ . Vemos que a medida que decrece el parámetro de amortiguamiento  $\mu$  decrece la amplitud de la oscilación. . . 154
- 2.36. Array de biopixeles que amplían el sistema del oscilador de Danino de 1 trampa de microfluídica a 500 trampas. . . . . 160
- 2.37. Diferentes ejemplos de disposiciones escultóricas creadas mediante el sistema modular de cajas de luz (Zuriguel y Virgen del Plug). . . . . 161

- 
- 2.38. Diagrama del sistema de funcionamiento general de ProtoPixel e interfaz de usuario del sistema ProtoPixel Create. Este último viene instalado en el Mac y se comunica mediante ethernet a un router y al hardware de control. Éste se une al sistema de satélites al cual se conectan las tiras de led ws2812b. . . . . 162
- 2.39. Esquema de montaje en sala de la instalación con medidas aproximadas. . 163
- 2.40. Fotograma de la instalación en la modalidad número 1, con ambas filas reproduciendo una trampa de microfluídica. . . . . 163
- 2.41. Fotograma de la instalación en la modalidad número 2, con una fila reproduciendo una trampa de microfluídica en rojo y otra en azul cada una con frecuencia de oscilación diferente. . . . . 164
- 2.42. Fotograma de la instalación en la modalidad número 3, con ambas filas reproduciendo un modelo de luminosidad de GFP que varía de azul a rojo. 164
- 3.1. Diferentes ejemplos de estructuras espirales en la naturaleza. . . . . 171
- 3.2. Diferentes ejemplos de estructuras dendríticas abióticas. . . . . 172
- 3.3. Diferentes ejemplos de estructuras dendríticas bióticas. . . . . 173
- 3.4. *Paenibacillus Dendritiformis*, imagen tomada con el sistema *Baffle* de time-lapse macroscópico DIY. . . . . 174
- 3.5. Cristales de nieve fotografiados por primera vez por Wilson “Snowflake” Bentley alrededor del 1902, quien en 1931 publicó el libro *Los cristales de nieve*, con más de 2.400 imágenes [178]. . . . . 176
- 3.6. (a) Morfología típica para condiciones isotrópicas en una célula de Helle-Shaw, (b) Latiz cuadrado, (c) Látiz triangular, (d) Látiz cuasi-periódico [181]. . . . . 178
- 3.7. Diferentes patrones de *P. Dendritiformis* en diferentes medios de cultivo, rico y pobre respectivamente. Imágenes tomadas con el sistema *Baffle* DIY. 180

- 3.8. Ejemplos de crecimiento de los estudios de Ben-Jacob [189] (a) Crecimiento compacto a 12g/l de peptona y 1.75 % de agar (b) Dedos densos para 3g/l de peptona y 2 % de agar (c) Ramificación fractal para 1g/l de peptona y 1.75 % de agar (d) Ramificación de ramas finas para 0.1g/l de peptona y 1.75 % de agar. . . . . 183
- 3.9. Velocidad de crecimiento en función de la concentración de peptona [189]. Los regímenes I, II, III corresponden a los patrones de la figura 3.8 (a), (b-c) y (d) respectivamente. La correlación entre velocidad y patrón indica la existencia de un principio de selección de morfología que determina que la morfología seleccionada por la colonia. . . . . 184
- 3.10. Diferentes morfotipos de *P. Dendritiformis* observados a través del sistema Baffle DIY. . . . . 185
- 3.11. Observaciones en microscopio electrónico de los morfotipos  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  [189]. . . 186
- 3.12. Fotogramas del *time-lapse* tomado durante aproximadamente  $2h$  del morfotipo  $\mathcal{C}$  crecido en medio de cultivo MH al 1 %. Imágenes tomadas con el OpenScope en el KeymerLab. . . . . 188
- 3.13. Imagen del mismo cultivo de la foto anterior después de aproximadamente  $4h$ . Se puede observar los patrones circulares a través de los cuales la colonia va expandiéndose en forma de zarza. . . . . 188
- 3.14. Transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  a diferentes durezas de agar en diferentes cultivos iniciales del morfotipo  $\mathcal{T}$ . Imágenes obtenidas con el sistema *Baffle* DIY. . . . . 189
- 3.15. Ejemplo de formas de onda mecánicas emitidas por un insecto en un superficie . La señal del emisor (verde) se propaga en tres fracciones: en el aire (azul, onda longitudinal) en el substrato (rojo, onda no longitudinal) y dentro de éste(negro, onda longitudinal) [214]. . . . . 194

- 
- 3.16. Figura original del paper “A Mathematical Theory of Communication” de Shannon, en el cual se muestra el diagrama de comunicación que va desde una fuente a un destinatario. . . . . 194
- 3.17. Dispositivos experimentales utilizados para entender la posible transmisión de señales mediante mecanismos no químicos y no volátiles entre colonias de *B. Subtilis* y *B. Carboniphilus*. . . . . 198
- 3.18. Aparato experimental y resultados de crecimiento de colonias de *B. Carboniphilus* bajo estímulos sonoros. . . . . 199
- 3.19. Resultados de los experimentos de detección de emisiones sonoras en *B. Subtilis*. La línea gruesa es la intensidad sonora en (*dB*) detectada por el micrófono. La línea delgada es la intensidad en los experimentos de control. La línea discontinua es el resultado de los experimentos de estimulación sonora mostrados en la figura 3.18 (b). . . . . 199
- 3.20. Medición mediante AFM de los movimientos de las paredes celulares de la levadura *Saccharomyces Cerevisiae*. . . . . 201
- 3.21. Montaje del experimento dentro de la sala anecoica del ICAT-UNAM. La fuente de mediciones de la placa de petri se coloca encima de dos espumas aislantes para evitar vibraciones. El sistema de medición FFT y de audio se encuentra fuera de la sala. . . . . 207
- 3.22. Calibración del sistema de microfonía y del acelerómetro en la cámara anecoica sin placa de petri antes de los experimentos para determinar el buen funcionamiento de éstos y los límites de amplitud mínima. . . . . 207
- 3.23. Sistema *Baffle* de captura *time-lapse* utilizado para la determinación de las transiciones de morfotipo a nivel colonia. El sistema está descrito en el anexo (C) a partir del metapaper “A 3D printable device for spatio-temporal quantification of fluorescently-tagged bacteria in spatially-explicit environments”. . . . . 208

3.24. Mediciones de las emisiones acústicas (micrófono) y vibracionales (acelerómetro) para cada día (lineas continuas), junto a las medidas de calibración (lineas discontinuas). . . . .	209
3.25. Medición acústica del cultivo descartado debido al sonido de crackelado del agar alrededor de los $1,5kHz$ y con una amplitud de cerca $+4dBV_{rms}$ (linea discontinua roja). . . . .	209
3.26. Mediciones de las emisiones acústicas (micrófono arriba) y vibracionales (acelerómetro abajo) entre días calibradas a través de la diferencia con las emisiones en los experimentos control. Se muestra las medias para cada casa (negro izquierda, rojo derecha). . . . .	210
3.27. Emisiones acústicas promediadas con el control entre días y entre cultivos para las mediciones con micrófono y acelerómetro. Se muestra la desviación estándar, el promedio y el $p$ -value correspondiente al $t$ -test. . . . .	211
3.28. Media de la suma de las mediciones acústicas del micrófono junto a las del acelerómetro entre días y para cada un de los cultivos. . . . .	212
3.29. Imágenes de las transiciones de morfotipo $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$ observadas, mediante el sistema <i>Baffle</i> , en 4 de 5 cultivos con 0,5% agar y 0,1g/l peptona a partir de la segunda semana de crecimiento a $37C$ . . . . .	213
3.30. Datos de los <i>data-sheets</i> de calibración de la respuesta en frecuencia del sistema de Matsuhashi con el micrófono tipo 4144 (arriba) y de nuestro sistema con el micrófono 4179 (abajo, curva superior). . . . .	217
3.31. Experimentos de AFM de medición de frecuencias y amplitudes en células vivas de levaduras <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> [234]. . . . .	223
3.32. Esquema de un biofilm y de los distintos componentes que pueden afectar la arquitectura y la viscoelasticidad de éste [242]. . . . .	225
3.33. Diagrama de un oscilador simple con amortiguamiento viscoso con un grado de libertad. . . . .	227

- 
- 3.34. Diagrama de flujo del sistema de “Comunicaciones Especulativas” (<http://interspecifics.cc/comunicacionesespeculativas/>). . . . . 236
- 3.35. Planos CAD 3D del sistema de microscopía. En la figura de la derecha se muestra el sistema x-y para desplazar el objetivo a lo largo de la placa. . . 236
- 3.36. Sistema de microscopía construido durante un taller impartido por Interspecifics en el C3-UNAM. Actualmente este microscopio se encuentra en el Peña-Miller Lab del CCG-UNAM. . . . . 237
- 3.37. Diferentes sistemas de análisis de visión por computador: detección de contornos, detección de rumbos, detección de flujo y detección de *blops*, de arriba abajo respectivamente. . . . . 238
- 3.38. Sistema NeuroShield (izquierda de la imagen) acoplado (RaspberryPi) al sistema de microscopía OpenScope del KeymerLab, similar al microscopio de Comunicaciones Especulativas. Este sistema permite enseñar a un sistema de neuronas digitales para monitorear el surgimiento de ciertos patrones clasificados con anterioridad. . . . . 239
- 3.39. Sistema experimental para determinar la influencia de sonido externo en la emisión acústica de colonias de bacterias dentro de la cámara anecoica de la UNAM. . . . . 241
- 3.40. Datos de las emisiones acústicas captadas con el micrófono y acelerómetro en *P. Dendritiformis* después de la estimulación sonora externa con ruido blanco a dos amplitudes diferentes. . . . . 242
- 4.1. Sistema mecánico mínimo capaz de producir quimeras compuesto de tres metrónomos acoplados entre sí . En rojo se muestra los acoplamientos entre péndulos mediante resortes con coeficientes de rigidez  $k_x$  [262]. . . . . 247

- 
- 4.2. Partiendo de un estado de sincronía con  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$  se llega con el tiempo a un estado donde dos de las fases de desplazamiento son iguales  $\phi_2 = \phi_3$  y la restante es diferente  $\phi_1$ , logrando un estado quimera con dos metrónomos en sincronía y uno fuera de ésta [262]. . . . . 249
- 4.3. Instalación escénica de la obra de Ligeti para 100 metrónomos. . . . . 250
- 4.4. Diagrama de la instalación de tres metrónomos acoplados entre si mediante resortes. En la caja de resonancia de cada metrónomo se dispone de un micrófono tipo piezoeléctrico para amplificar la señal del *click* evitando así la interferencia acústica de los otros metrónomos. . . . . 251
- 4.5. Pantallazo de la GUI del sistema, desplazado levemente de la fase inicial de 0 radianes. . . . . 253
- 4.6. Pantallazos de las diferentes dinámicas obtenidas en el sistema en las fases aproximadas de:  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$  y  $\pi, \pi/2, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$  (de izquierda a derecha y de arriba abajo). . . . . 254
- 4.7. Forma de onda y espectrograma sobreimpuesto correspondiente a la sonificación de 20 péndulos a partir de 20 osciladores sinusoidales de frecuencia variable. Se observa una línea de emisión espectral máxima alrededor de los  $10kHz$  correspondiente al estado de sincronía de fase en 0 radianes. (Análisis de señal hecha en **Sonic Visualiser**.) . . . . . 255
- 4.8. Vista panorámica de los distintos fenómenos estudiados a lo largo de esta tesis, emplazados en un diagrama orientativo de órdenes de magnitud en coordenadas espacio-temporales. . . . . 256
- 4.9. Imágenes del instrumento SDSS (Sloan Digital Sky Survey) que ilustran su resolución de datos, desde las estructuras de clusters y paredes, y ampliando a la galaxia del triángulo (M33) y de una región (NGC 604) de hidrógeno interestelar ionizado dentro de ésta [264]. . . . . 258

- 4.10. Datos y simulaciones numéricas de estructuras a gran escala. Según modelos numéricos se estima que la fracción de volumen ocupada por los vacíos es del 77 %, por las paredes de 18 %, por los filamentos de 6 % y por los nudos de  $> 0,1$  % [267]. . . . . 259
- 4.11. Gráfica del espectro CMB medido por el satélite COBE, correspondiente a la medida más precisa de radiación de cuerpo negro que existe en la naturaleza. . . . . 262
- 4.12. Imágenes de la CMB en varios detectores y espectro de emisión correspondiente a las anisotropías de la CMB. . . . . 263
- 4.13. Observación del primer pico acústico en las anisotropías de la CMB alrededor de la escala angular de  $1^\circ$ . . . . . 266
- 4.14. Simulación por computador del agrupamiento de la materia (oscura y bariónica) debido a las fuerzas de gravedad en un Universo post recombinación (de  $z = 30$  a la izquierda a  $z = 0$  a la derecha).  
(<http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>) . . . . . 267
- 4.15. Simulación por computador de una onda sonora esférica a partir de una región densa al inicio de la época de plasma (pico naranja primera imagen) que se propaga hasta que la materia bariónica se desacopla de la radiación 380000 años después (fotograma en verde) [270]. . . . . 269
- 4.16. Propagación de las ondas bariónicas acústicas vistas en función del perfil de perturbaciones de masa para la materia y radiación. La gráfica (columna 1, fila 1) muestra la perturbación inicial a  $z = 6824$ ; (2,2) corresponde al momento de la recombinación con los fotones completamente desacoplados a  $z = 478$ ; (2,3) a  $z = 10$  muestra el momento en el que las galaxias se empiezan a formar y donde permanece una sobredensidad centrada en el origen y en un radio de  $480 Mly$  debido a la huella de la onda de sonido. . . 276

4.17. Superposición de perturbaciones primordiales en el tapete cósmico provenientes de fluctuaciones cuánticas en la época inflacionaria. Éstas están distribuidas aleatoriamente en el espacio y poseen una amplitud igualmente aleatoria de materia y radiación. . . . . 278

4.18. Visualización en 3D de la evolución de fluctuaciones cuánticas en el vacío. <http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/index.html> . . . . . 297

4.19. Horizonte de eventos en el espacio de de Sitter. Las partículas fuera de la esfera  $r = c/H$  nunca pueden recibir señales (de luz) desde el origen, ni tampoco un observador en el origen puede recibir información de fuera de la esfera. La expansión exponencial  $a(t) \propto e^{Ht}$  se acelera rápidamente de manera que un conduce a cualquier observador al punto en que la recesión al origen es efectivamente superluminal (i.e. para comunicar a dos observadores en este punto haría falta una señal que viajar más rápidamente que  $c$ ). Por otro lado, el tren de ondas representa la generación de fluctuaciones en este espacio-tiempo. Las ondas con  $\lambda \ll c/H$  (definiendo  $c/H = H^{-1}$  para  $c = 1$ , llamado radio de Hubble) ocupan una región de espacio plano y por lo tanto ahí se generan las fluctuaciones cuánticas normales en un estado vacío (las vistas en la sección anterior en el oscilador armónico cuántico). A medida que estos modos (fijados a una longitud de onda comòvil, la cual no varia con la expansión del espacio-tiempo) se expanden a longitudes  $\lambda \gg c/H$  ( $\lambda \gg H^{-1}$ ), y en este punto la causalidad fuerza a las fluctuaciones cuánticas a “congelarse” a una amplitud que finalmente deviene la semilla para las estructuras a gran escala. . . . . 300

- 4.20. Esta gráfica muestra como fluctuaciones en el campo escalar inflacionario se transforman a fluctuaciones de densidad al final de la época inflacionaria. Diferentes puntos del Universo se inflan a partir de puntos donde el potencial está perturbado por  $\delta\phi$ , similar a dos partículas rodando a partir de diferentes puntos de inicio. La inflación finaliza a tiempos separados entre si por  $\delta t$  para estos dos puntos, induciendo una fluctuación en la densidad. 303
- 4.21. Representación gráfica de los cuatro modos de oscilación posibles para el sistema clásico descrito por el hamiltoniano 4.108. . . . . 305
- 5.1. Diagrama de varias compuertas lógicas construidas a partir de encapsulados de reacciones de B-Z. De manera análoga a éstas se podrían construir dispositivos microfluídicos y realizar cómputos binarios o de *fuzzy logic* en construcciones genéticas oscilatorias. . . . . 322
- 5.2. Idea para la instalación “BioPixel Array” en analogía entre el sistema de biopixeles en bacterias y los sistemas de programación mediante tarjetas perforadas. La instalación recrearía una posible hibridación entre los primeros sistemas de computo clásicos y los nuevos paradigmas de bacto-computación. . . . . 324
- 5.3. Análisis realizados por Pablo del Keymer LAB, sobre la vorticidad en *P. Vortex*, medida como el rotacional del campo de velocidades. En estos estudios se observa como existe un equilibrio racémico quiral 50 – 50 en las bacterias a nivel individual (figura izquierda). En la figura de la derecha se observa que el núcleo del vórtex es *CCW* mientras que el brazo que se le desprende es mayormente *CW*. Ésta y otras observaciones merecen ser estudiadas en un futuro. . . . . 327

- 5.4. Dios el Geómetra representa el acto de creación del mundo (Francia, siglo XIII). Según la traducción del copto sahídico al español, el primer versículo del Evangelio de Juan dice: “En el principio existía el Verbo y el Verbo existía con el Dios y Dios era el Verbo”. El Verbo, que a la vez es una traducción de la palabra griega «Lógos», puede significar pensamiento y habla, es decir, razón, proporción o lógica, entre otras cosas. En nuestra interpretación herética adulterada con ciencia, lo podemos entender a conveniencia como el sonido. Este sonido en los escenarios inflacionarios correspondería a la perturbación del vacío mediante los campos escalares cuánticos. A partir de ahí y llegando a la época de la recombinación citamos el tercer versículo bíblico del libro del Génesis: “Y Dios dijo: Sea la luz; y la luz fue”. Así podemos interpretar, *sui generis*, que el sonido engendró (dio a luz, nunca mejor dicho) al fotón. Ahora bien, cuando el Universo deje de ser un universo observable y se vuelva oscuro, podemos preguntarnos si el sonido aún persistirá de la misma manera en que éste ya existía antes de que el Universo fuera visible. . . . . 339
- 5.5. Incurrir en el recuento de los mitos, como hicimos en la figura anterior, y más allá de lo anecdótico que pueda suponer dentro de esta tesis el ejercicio de hibridarlos junto a contextos de carácter científico, sólo adquiere un sentido, y es de cierta manera honesto, si se engloba en una visión comparativa dispuesta con el fin de sensibilizarnos ante lo nouménico en estos escenarios cosmológicos. Por ello incluimos a modo de sugestión como última figura, representativa de la cosmogonía mesoamericana, una imagen del *Códice Borgia*, la cual muestra una representación del dios creador Tezcatlipoca del cual brota de su boca una flor (*Xochitl*), asociada ésta a la palabra, al canto y a la música. . . . . 343

---

B.1. Diagrama de representación. La representación básica tiene 3 componentes: (i) el espacio de los objetos físicos, (ii) el espacio de los objetos abstractos, (iii) la relación de representación $\mathcal{R}$ mediando entre los dos espacios. . . . .	408
B.2. Diagrama de conmutación. . . . .	409
B.3. Diagrama ciclo de computación. . . . .	410
D.1. <i>Patch</i> del sistema de sonificación de osciladores sinusoidales. . . . .	471
D.2. <i>Patch</i> del sistema de sonificación de metrónomos. . . . .	471

# Introducción Literaria

## La Fonoteca de Babel

*Extracto del libro encontrado en la Biblioteca de Babel -*

**Hexágono:** gqvz240xym72y377xzgr8jkcns5il77dwhqi23gl8vzapnrewvysv7wftdkal  
p3t1jd5m7k332tuh9fs0ah2a1pgy5ffdkjvuawgzuoov2bu0nyyxt dib1sbpp8af2qzkml61c  
rppsaheyu2e4jd8ci666ahdo4t3e8ih84ey8ug466mbn165v4h3s76dba8oagbudgp5c2cyun  
2qpa8b7a9ql7yccbq5gqnnbyjdjj5i4yueg07hruk5l1rjg10tfap1id2gax84udm5wdeyge5  
dhfpymg3uqves189odev2mng9808pe5szgstdbgrgk8a5wg2tfeyxx3yompv288qu74ogiamw  
f3nig5hxsn6kh9lvolkrrybduifzbpbdx14h287kp0f8mp1ygmwq1cxkgca2ih5rnq32kh3rg  
htbjckuxmjhs25d1vrz3ulpta40hn8oayao2672pfvltps9o7aebjsjkeufgu8hlrnehy4u0vf  
gl80jpxrr2rcgomrxix6p9ycqh5pov6twzeu9fb95vrnj8ma7e0pmx232gdh1yt8eydlm7xc4  
b3phvr4n77il10s7qw63f8iay3ji3a8v5w9v04qw2mw8dv6826iu3bot66gje9ot741s7poxa  
419h8nqbo7pi814mmc7l34b4gguxhuoigjdfa3benrfip87wuaddm5mf04mpeq54ld39rpyxu  
nqw353mf6y040belrkahfkg49fatrh9dxbi4c6ul44zkspq1iwu8myb66rzmxe hh5i25qaf8r  
wkp0ekx59scl658kno149r81so2zfd3qmuogicx tmlhzn6rerhu2s9thc7hix01412o21pyy  
we51i2f3t9txeosez132tax72qqu30rlo700z7sidki8ftemqgiw3stdmd2c2xz0337g8zky4  
xi0mew2vtmpasmkw1n0gzmd29nbe36q6s70it777qxw1pt72hb2438thsnzktxfwsx0ruh9h0  
20bum7ugs0bgymnes84xae4msvp9l4ptkiurkmrk2zxm8uf4g18zhosvohwfh05ddh7w2dlhg  
sl0rluv0wgu6qniuemfcw2pc2nuk4ohl43cmn1mhl1c8qlbohd6z98otkfs0ka9z9a4xnbxkz  
xn3ca9x6vqjkj95ns49zsj33aiy7qa183h4xnd60r06zok4yr3a64bsza8ax6s5y81gt0zh9f



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

by8ibzatcogsay62orlvvtjw74mexec1esh69yfnkmohtnj0kxy8yymadtw1su54pfg2otfcl  
8h3ajfnlp95d01z33wmczoug2doyaqm0hzc53bfffglb298cpd8gzbsprexmswq857sirc  
vjdxwhyr114v5epd7oj1h0nfvxug18f9apjj6v3g5fhwyxs6wm8u99b2bu5a3yvml43vdy1g7  
c9asiwk47qxs9xn591s7efa4w3mkiyfkm6tbjdwoiowytl2vr2rbgb4lnozfcocu4zyyjf  
paxpp1yn631kc9riu1a1tagodj3ixt6zgg2li9m1j3ywhc8frfzr9f2xz1983v3lnkmja7q8o  
m4pdhzatqu9voja8rf3rqb5piswum5tupry0xmtmxa224ky6bgkoeihpnd3n64j1esik33pl  
qziaiqofxmik9mmw8ir58rc3pm28o5wgcgkx1ynykke0do33qn1mvr75y71mijgd1a293u  
swsusek9hl5zsnifie83tbqwulcfigwbtc2qmse8kwmt4lf9doqiucjm3ytkadpxf32tv5p4fe  
uoivavpdc0qgfo0cmtm0nri043kt63m70bsw7rp0922h36x2kyxskbkgyoyc6hrv2lvuyz4n  
3zaddytagx0ha9uf0ixluzjomn35uxwhetbjho6ni5u6asq961fdt37huo2mos6rnusrtl924  
icx6qd486ipm0c2phmgewyn32t83cimf74i1j61bzi71946eafyikgxaetb0xy0hf99f0hflt  
ip8idxl4bl4in3tnxw001puo065oruv6dxjm0phslk1p4p2kdc6ykf98m3jwlvxo9dds9iy9s  
ia54gie0i588x57tb3777y51jh7p3n7si1c3t64biyawsejlf1a33muupv033yzos2o7e9tp5  
2dgpmtmits2o4do9zlp4yijxf52dbj8ios9cl6c1qnpj9vkorlxajhy2g92sj0spfyvuzjv  
ftx4cekrv46kddmym62ps3j61botgvlbr3ypj05swdtw4xw3jg8dffiqenle1p5p6r6ke6vxd  
6ba6tn6hnbj706ncqt1k1onq4m69uhn3n8g2q8iwjhyn291yfeqx40cvwa7yevllbvl71qic  
re3d2rr6g20f92040u9e7c7gh1rcs1h5lqn276nk4o98kq0a7yaih4vkogcti2ilodrj27w66  
6drywrdd3w9znm3w5cslxqswg3pcnm8y90tdwuo3pmw2iegd2rqiglrso2lhlhyn0pmwr7fls  
hzl1c1cvqqh1xnxw6m0osavbkfshnd5m71z96szkft75jdyx9le6x1g2om97287g7640dz9f6q8  
2c5cw8np1qvs3ft3tv5v9kgger2j1a46pqmdd0pb8vfa9bnty3yfctuhih2bwdl1zns1jdpdt  
m6gi7b089nsgk6ipdko7hgoxba8ze5wlyc1pbl1f35i2rmmip8dqr4dn07lpffn8sk5mn1kkh  
2aj8o17od1z82s0o1555qjb3plj9n8eyyj40knlzfhryeccimwpkr0nkclpxnhq54clb3ebqh  
hi224sc6dszwm642m10fsz8r8f7v17tc5l1eb4yh6z3thu79s2unt7twsbj9tnzxme5fkdz0  
0um5rgvgu18jxe8vxqh6t5heu77i5zigesg9y8vk11m1fnonu533qg14s40sw5geken97rv3m  
dke8j06i8j8fh8eycoy0ze4sxdg4z573828u1mupqzlp6a5w7ky1ycoic8l1bj24jn1gzdol  
8utvy05yrmtx2ff2v6whindnzisf86cxm92y6lt0ipfbyhtncb2x4kcima9n7p2qvanem137e0  
zp7imjzzw4ah7cuz3hd9pavusd24nx5xje2x28tcpe45ixtnz7kyvci3lwtgwin3ahrtojef  
jnpm9vkv81ml2jfsghmuhvsnhcq96oov888fw972lpajgg7qa4j84v

**Pared:** 1

**Estante:** 4

**Volumen:** 31

**Página:** 240/410

- correspondiente a la transcripción del registro de un pentágono incierto de la Fonoteca.

\*

Auscultando como detective el más allá detrás de la puerta, escuché, en uno de los incontables pentágonos por los que ha discurrido mi vida de fonotecario, una historia acerca del Universo (que, según el narrador de ésta, otros llaman “Biblioteca”).

Ahora que mis oídos apenas pueden descifrar lo que hablo y mucho menos lo que escucho, siento que previamente a empezar a contar esa historia debo explicar primero como me topé con ella, antes de que mi voz se convierta en un murmullo en el viento escaso que me rodea.

La Fonoteca, por la que he itinerado en el tránsito de mis días, se compone de un número super-exponenciado, tal vez transfinito, de salas pentagonales que se extienden cual micelio, ramificándose, una tras otra incesantemente, en numerosas direcciones. La longitud de cada una de estas ramas es dudosamente variable. En cada una de las salas hay tres puertas, dos en paredes contiguas y otra a su lado opuesto. Éstas permiten el ingreso a otros pentágonos a veces y otras no, frustrando laberínticamente algún sentido lineal en la búsqueda. En los otros dos lados de la sala hay dos altavoces respectivamente enfocando al centro, y en éste junto a una tornamesa un disco metálico surcado de no

---

\*<https://libraryofbabel.info>

más de 12 pulgadas de diámetro.

El hecho de que pueda existir un centro en la Fonoteca, del que emanaran radialmente todas sus salas, es materia de controversia entre los habitantes de ésta. He escuchado, en alguna de las salas superiores, en las que se supone que residen ciertos hechos que disuelven el holismo epistemológico, que la forma de los discos metálicos es una representación simbólica a escala del Universo circular expandido de la Fonoteca. En otras salas, sin embargo, se postula, quizá no contradictoriamente, que la Fonoteca es una esfera cuyo centro caudal es cualquier pentágono, cuya circunferencia es inaccesible. El hecho de haber encontrado, según sentencia del tiempo, ese relato mencionado sobre la historia del Universo me hace pensar en la veracidad de la primera hipótesis; un centro fundamental de la Fonoteca que se conecta a un tipo de fructificación, cualitativamente diferente, que emerge verticalmente de ésta: la “Biblioteca de Babel”.

Cada uno de los discos, que se guardan impolutamente en las salas, reproduce o replica indistinguiblemente un sonido, o una secuencia de éstos, de manera cíclica y *ad infinitum* por una duración de 4'33" o indeterminada. En alguna de mis exploraciones, siguiendo la inercia de una especie de algoritmo interno de movimiento o de intuición, me he encontrado con sonidos que han hecho erizar mi piel y otros, la mayoría, que han traspasado a través de mis membranas inmutablemente.

La resonancia del zumbido de alas de una parvada de colibríes sobre una laguna helada, la superposición de todos los truenos que impactaron sobre la ciudad de Sao Paulo durante el año 2015 comprimidos en un segundo, un grano de sonido del último llanto en mi je, la vibración de la primera célula procariota burbujeando en su charco fundamental, el tic tac irregular de un péndulo caótico, el tic de unos pies de oruga sobre un cristal de cuarzo, el tac rebajado de un dedo índice de un animal desconocido impactando nerviosamente sobre una laja de madera de amate, la evaporación de una gota de metano sobre la superficie de un mar en el ecuador de Urano, la narración mitológica de cómo Quetzalcoatl regresó a Tenochtitlán en forma de espejo negro humeante para expulsar a sus saqueadores, la narración en una voz aterciopelo-glitchheada de como un presidente de origen inuit

colonizó el centro de la Tierra, saludos en 55 idiomas emitidos por una inteligencia artificial pansexual, ruidos blancos, marrones, rosados, micacu, ruidos de superposición de todas las frecuencias con sutiles diferencias en su potencia espectral, ruidos en casi todos los pentágonos que inundan de sin sentido cualquier ánimo de indagación.

A parte del vacío generalizado que provoca el continuo encuentro con esta multiplicidad de cacofonías, en muchos otros discos se encuentra también, sorprendentemente y en diferentes cantidades dentro de las grabaciones, la antítesis material del sonido: el silencio, que va inundado ciertas salas periódicamente dejándonos atónitos en la escucha del palpito de nuestro propio corazón. Estos silencios reiterativos han propiciado una heterogeneidad de teorías al respecto, las más aceptadas entre los fonotecarios son: uno, que esos silencios contienen, en su duración, un sonido que sobrepasa nuestra percepción audible limitada y al que sólo ciertos habitantes, pertenecientes a los estratos más profundos de la Fonoteca, pueden acceder; dos, que esos silencios son el resultado de la intercesión sistemática de una secta de fonotecarios de hábitos mudos que se dedica a borrar cautivamente sonidos por las salas, a riesgo de ser perseguidos, en la creencia de que sólo el silencio absoluto puede revelar la existencia de un Dios que habita omnipresente y en algún rincón de la Fonoteca.

Uno a veces piensa ineluctablemente, y sin empatizar necesariamente con ciertos dogmas que se propagan por ahí, que debe haber algo rondando más allá; y un hecho es que aún recuerdo etéreamente, dentro del pentágono que me vio nacer, un sonido, en el intersticio del silencio, mínimamente audible por mis oídos pero perceptible en mi piel, que contenía el movimiento de la primera expansión y rarefacción material del universo primigenio (hasta el momento aún desconozco si todos los fonotecarios nacieron rodeados de él, en una suerte de placenta sónica).

La otra circunstancia de carácter indescifrable y ampliamente conjetural, que en este momento me empuja a dejar al menos una breve constancia de ella, es el hecho de haber encontrado, en mis peregrinaciones ascéticas a las capas más elevadas de la Fonoteca, la historia, rumor de muchos y codicia de otros tantos, de la “Biblioteca de Babel”. En ella

se relata la conformación de un Universo incomprensible, compuesto de “libros”, los cuales contienen una representación de la realidad a través de “símbolos ortográficos”.

Sin llegar a descifrar muy bien los misterios que plantea ese Universo, intuyo que la semejanza formal, aunque sensiblemente dispar, de esa “Biblioteca” con la Fonoteca abre la puerta a la posibilidad de una conexión, física quizá y situada tal vez en el centro de ésta, por dónde brota, permea, fluye y circula el conocimiento entre ambos mundos. No sería del todo insensato pensar que un “bibliotecario”, con espíritu de topo, escarbó hacia las profundidades de la “Biblioteca” hasta hallar nuestro mundo y que dejó constancia del suyo en él. Un mensaje en una botella para que alguien como yo lo encontrara. Probablemente no sea así y que mi concepción con ímpetu de fuga fonocéntrica y esa narración sea uno de los tantos diluvios de absurdidad que contiene la Fonoteca.

Mientras tanto, aunque el alcance factual de esa realidad no trascienda en éste punto a la mera ensoñación, me contento en tramar la posibilidad especulativa de que algún “bibliotecario” deambulando un día por los mundos de la Fonoteca se encuentre con mi voz y escalando de nuevo hacia su universo deje un testimonio con “letras” de mis palabras en algún ángulo de un hexágono remoto.

Ésta historia empieza así:

“El universo (que otros llaman la Biblioteca) se compone de un número indefinido, y tal vez infinito, de galerías hexagonales, con vastos pozos de ventilación en el medio, cercados por barandas bajísimas. Desde cualquier hexágono se ven los pisos inferiores y superiores: interminablemente. [...]”

# Introducción Narrativa



... como se preguntaba el escritor Roberto Bolaño:

¿Qué hay detrás de la ventana?

En los finales de mi segundo año de doctorado me encuentro en, siguiendo un orden de espacialidad *in crescendo*, mi estudio, de mi casa en el cerro Tochpualoyan (cuenta de conejos, en nahúatl), en Santo Domingo Ocotitlán, Tepoztlán, Morelos, México, Norte América, América, la Tierra, el Sistema Solar, la Vía Láctea, el Universo, y hasta ahí, siendo muy reduccionistas, como soy y voy a serlo a partir de ahora.

Desde la ventana de mi estudio se despliegan diferentes planos de profundidad: a lo lejos las nubes en el cielo, cirros y cirrocúmulos. Abajo de éstas, las montañas del Parque Natural del Tepozteco, con sus estratos geológicos que se asemejan a una familia de setas u ovis, como por estas tierras los nombran comúnmente. Los árboles, robles, encinos, cacahuates y tepehuajes mayormente, se despliegan antes de topar con mi ventana. Detrás de esta, yo escribiendo estas palabras y preguntándome:

¿Qué hay detrás de la ventana?

La orografía y los gradientes de convección térmica dan forma, contorno y relieve, a las nubes. Sus formas son cambiantes, pero ahorita conforman una especie de peinado en

el cielo.

Los cerros, estáticos según mi percepción de su tiempo interno, se imponen como un conjunto de láminas y planos inclinados y verticales alternándose. El manto vegetal que las envuelve motea la piedra debajo de éstos.

Más cerca los árboles, en sus copas, se desenvuelven en ramificaciones y hojas, y optimizando la búsqueda del sol, crecen alzando su espacio hacia el cielo y colindando adyacentes entre iguales en el suelo.

Yo dentro de la casa, mirando por la ventana me uno a la experiencia y me pregunto cómo esta complejidad que estoy percibiendo existe frente de mí. Las respuestas que puedo poseer, y los por qué de eso que percibo lo puedo nombrar como complejo, son ampliamente cualitativos e históricos.

"The whole universe was in a hot dense state [...]"<sup>†</sup>, algo así como el Big Bang sucedió, las inestabilidades gravitacionales empezaron a juntar la materia, las estrellas comenzaron a brillar, se formaron los planetas, la vida en la Tierra se inició, aparecieron los humanos, se formaron sociedades, y aquí estamos, tú *-mon semblable, mon frère-* y yo y ambos sabemos de alguna manera que este universo es complejo y algo sobre la secuencia en cómo esa complejidad va creando más y más formas complejas, pero el poder definir esa complejidad aparente de una manera precisa, científica, falsable, no es tan trivial.

El espacio que abarca mi vista, desde las nubes hasta mi ventana, como diría Kant, es un *a priori*, y también lo es por lo tanto cualquier propiedad que pueda nombrar de él. Mirar por la ventana y decir "complejidad" en voz alta, como acabo de hacer a modo de reafirmación interna externalizada, no conforma un descubrimiento en sí. La complejidad no es una característica objetiva del mundo si el espacio tampoco lo es.

Aún así, y bordeando estas orillas metafísicas del pensamiento, distingo patrones dispares pero con una cierta regularidad intrínseca que puedo definir y nombrar, de la misma manera en que lo acabo de hacer. Distingo ahí afuera una geometría, diferente a la de la ventana rectangular que encuadra este panorama, que adopta distintas formas y que

---

<sup>†</sup>The Big Bang Theory, CBS Series.

abarca distintas escalas espaciales.

Esa complejidad insiste en manifestarse, de otras maneras, dentro de la casa también. Los frijoles se están cociendo en la olla, mi perrita Lava se arrastra del sol a la sombra de la entrada, e Idalid mezcla en círculos levógiros con el pincel un acrílico rojo en agua. Y yo estoy aquí ensimismado, tecleando en mi compu, mientras tolero pasivamente que se acumule spam en mi bandeja de entrada, dispersando mis pensamientos en torno a la fenomenología de lo complejo.

En esta aproximación descriptiva simple, como ya he dejado dicho, de mi entorno se puede captar, a parte de lo pueril, lo sesgada que es al contener tan sólo un modo perceptivo que estructura el fundamento de mi noción de complejidad: la vista.

Esta complejidad, en su ámbito visual, puede ser entendida a través de un concepto: las nubes, las montañas y los árboles se ajustan a un patrón o estructura y éstos tienen un formalismo matemático subyacente - *Ubi materia, ibi geometria*<sup>‡</sup>.

De hecho las salidas de cualquier función matemática conforman un patrón matemático, los cuales cuando se requiere se disfrazan de geometría, y a éstos se les puede adscribir formalmente una complejidad inherente: una línea recta es sencilla, un fractal es complejo.

Y así de estas maneras, diluídamente inspiradas, un pensamiento matemático que se adhiere a mi mirada se entretiene en la búsqueda de esas regularidades a través de la ventana y a veces, sólo a veces, un pensamiento científico, *grosso modo*, intenta explicarlas y predecirlas deambulando entre el fundamento teórico y el experimental.

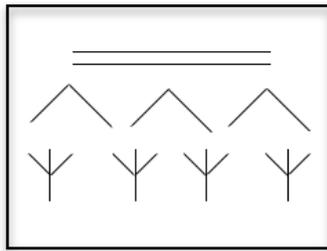
La simetría, concepto que se engloba y limita el entendimiento de patrón, intercede ahora en este paisaje que se despliega ante mí, transformándolo en dos nubes, tres montañas, cuatro árboles y una ventana.

Dentro de la complejidad profunda de los patrones que se observan en la naturaleza podemos superponer, o más bien extraer una esencia vertebral de éstos que trate de simplificarlos, para así enmarcarlos dentro de categorías, medirlos y cuantificarlos.

Esa medición, que surge de la esencia formal de lo que en matemáticas se llama espacio

---

<sup>‡</sup>Johanenes Kepler, 1571-1629.



métrico, conforma la estructura de una maquinaria teórica que nos permite decidir y por lo tanto decir que algo es visualmente complejo.

Quizá un *status* ontológico comúnmente asumido en la matemática nos empuja a pensar que estas categorizaciones poseen una especie de existencia “Platónica” separada de cualquier instauración física actual del universo, pero si, una cosa es el acto observacional que produce mi mirada y la otra la entelequia mental a la que mi percepción se adhiere.

Este acto observacional es en realidad un acto de integración perceptiva multisensorial que trasciende y se escapa de la compartimentación anterior dentro del ámbito visual. Así volteando el punto de vista, como hace Bolaño como coda en *Los Detectives Salvajes*, detrás de la ventana hay un sujeto, y éste aparte de mirar también escucha.



Redistribución de flujo sináptico:

Desde la ventana de mi estudio se despliegan diferentes planos de escucha: a lo lejos, detrás del cerro un rumor de tránsito de autos, motos y camiones del pueblo y de la autopista que rodea Tepoztlán. Al fondo allá en el cerro de enfrente y desde una casa, una música de banda nortea que se mezcla con el zumbido de una podadora o de una sierra radial, más cerca de mi ventana, entre los árboles y matorrales, pájaros, al menos un momoto y un cuclillo, insectos, chicharras y otras criaturillas diminutas que no puedo

identificar. Detrás de la ventana si me concentro también puedo escuchar mi respirar.

Como dijo Heráclito, hace más de 25 siglos, “Todo fluye. . . nada permanece”. La percepción visual de la complejidad puede entenderse a partir de una captura instantánea desde mi ventana, pero la percepción auditiva de una supuesta complejidad a fuerzas tiene que incluir otra dimensión descriptiva: el tiempo. Simplificando y extrapolando el asunto podemos entonces decir que un patrón visual complejo se percibe en el espacio y un patrón auditivo complejo se percibe en el tiempo. Aún así, pisando levemente de nuevo con la mente en tierras kantianas, el tiempo, al igual que el espacio, es también un *a priori*.

La lógica y las matemáticas, como sistemas formales que desde la percepción visual inicial pueden ejercer una representación sobre la forma y la configuración de lo observado, existen fundamentalmente fuera del tiempo, y por lo tanto sus verdades son atemporales: eternas y certeras. De la misma manera, debido a esta discriminación temporal, éstas son generalmente insuficientes para describir lo que se proyecta ahora a partir de una escucha del mundo: la capacidad de cambio, de generar estructuras nuevas, procesos, entidades, i.e. la creatividad intrínseca de la materia. De la estática y las leyes de reversibilidad hay que transitar entonces hacia la dinámica: el flujo, el ciclo de cambio, el ritmo y la irreversibilidad.

Agarrando con los dedos cada una de las dos puntas del hilo, la complejidad en la evolución cósmica junto a la que percibo sentado desde mi ventana se delinea simultáneamente a través de esta narración subjetiva y cualitativa de eventos no relacionados unos tras otros y también mediante una observación y escucha con resonancias épicas, en lo que se refiere a esta búsqueda de grandes unificaciones o de al menos explicaciones globales de un mundo, la cual constituye un intento de aproximación objetiva y cuantitativa a éste.

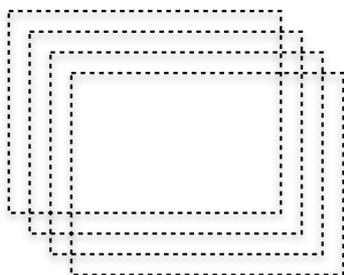
A partir de aquí anarquismo epistemológico (y un poco de valemadrismo prudente): para encaminarnos a dilucidar qué cosas en la naturaleza tienen una naturaleza compleja, valga la redundancia, “anything goes”<sup>§</sup>.

---

<sup>§</sup>Paul Feyerabend, 1924-1994.

Aún así como anclaje de partida en nuestra exploración sobre el entramado de la morfología temporal, de formas ya no en el espacio sino en el tiempo, partiremos de una premisa conceptual delimitada por los conceptos entrelazados de cambio y estructura. Un avance en el tiempo de un cambio que contribuye al crecimiento espacial de las estructuras complejas y este último que a la vez retroalimenta al primero generando cada vez más cambios.

Entonces, ¿Qué hay detrás de la ventana?



En fin. . .

“Sólo el misterio. Sólo el misterio (que) nos salva.”<sup>¶</sup>

---

<sup>¶</sup>Federico García Lorca, 1898-1936.

# Capítulo 1

## Hacia una Exploración de la Emergencia en Sistemas Complejos desde los Dominios Sonoros

Los conceptos de emergencia y de auto-organización surgen como ideas formales en torno a cómo la materia se transforma, en su multiplicidad de manifestaciones físicas, desde las escalas cosmológicas a las de la evolución biológica, hacia la complejidad.

La característica esencial de la emergencia es la existencia de un comportamiento global, el cual es novedoso respecto a las partes constituyentes de un sistema. La auto-organización se refiere a comportamientos adaptables, los cuales adquieren y mantienen un incremento en el orden de un sistema de manera autónoma. Ambos conceptos se refieren a fenómenos o procesos dinámicos que surgen y evolucionan en el tiempo y se enmarcan dentro de una tradición epistemológica universalizante, con orígenes en la física clásica post-newtoniana, con la aspiración de ser conceptos vertebrales para una teoría unificadora de la complejidad, haciendo de esta una teoría del todo.

No obstante esta complejidad que surge, sin saber muy bien cómo, a partir de un universo sin estructura, o similarmente de un universo completamente ordenado, se manifiesta a través de una gran variedad de mecanismos productores que la generan. Diferentes



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

mecanismos producen diferentes dinámicas, diferentes patrones de evolución en el tiempo y a escalas espaciales. Por este motivo quizá la complejidad se puede entender más bien como un metafenómeno<sup>1</sup> dentro de múltiples complejidades; no una ciencia única sino más bien un conjunto de analogías a través de una variedad de disciplinas empíricas específicas.

El estatus de esta tesis, dentro del marco multidisciplinar intrínseco a las tecnologías musicales, y mi formación como científico, artista o bien ya como explorador híbrido de la no disciplina juega en este favor. La investigación que se muestra a continuación abarca diferentes horizontes del conocimiento y trata de contribuir a generar reflexiones de carácter especulativo en torno a analogías, a partir del sonido, entre diferentes usos de la complejidad en dominios científicos específicos tales como la biología sintética, la microbiología, la mecánica clásica o la cosmología. Por lo tanto esta investigación que se muestra a continuación elude visiones captadas desde una sola dirección, las cuales normalmente conducen a espejismos, tal y como se describe en la doctrina *anekāntavāda* perteneciente a la religión ancestral jainista y en su parábola de los siete ciegos y el elefante.



**Figura 1.1:** Grabado en un templo jainista de la India. “It is impossible to properly understand an entity consisting of infinite properties without the method of modal description consisting of all viewpoints, since it will otherwise lead to a situation of seizing mere sprouts (i.e., a superficial, inadequate cognition), on the maxim of the blind (men) and the elephant.” Mallisena [1].

<sup>1</sup>Tomando el prefijo meta el cual significa “más allá” en Griego, entendemos aquí por metafenómeno algo que opera en un nivel de abstracción mayor y que causa o influencia varios elementos en un nivel inferior.

Por otro lado desde un punto de vista cognitivo, una transición hacia la complejidad de un determinado sistema está en principio sujeta a ser percibida por un sujeto a través de sus sentidos, o bien experimentalmente a partir del análisis o inferencia estadística de un conjunto de datos empíricos pertenecientes a un sistema.

Normalmente la vista es el canal sensorial predominante para percibir a través de la observación estos tipos de cambios, pero de la misma manera como ya hemos apuntado, a través de una aproximación multi-compleja, de los modos perceptivos en este caso, nos podemos preguntar:

**¿Se puede también percibir y entender la emergencia y la auto-organización desde el punto de vista de la percepción auditiva y dentro del marco de los fenómenos sonoros?,**

y a la vez de forma colindante,

**¿Es posible transponer y complementar las modalidades de extracción de información y significado de determinados fenómenos a través de una escucha de la naturaleza?.**

Para empezar a explorar posibles respuestas, que se deslinden del entramado multidisciplinar que permea a estas preguntas, debemos definir primeramente una terminología clara e ir a los orígenes de los conceptos de emergencia y auto-organización.

Así partiendo del estudio de estos dos conceptos, los cuales se ramifican en varios dominios del conocimiento, se conformará el marco teórico que estructura mi investigación; el cual servirá para dotar de validez formal al conjunto de proyectos experimentales que se proponen posteriormente a lo largo de esta tesis.

## **1.1. Comportamientos y Propiedades Emergentes y de Auto-Organización en Sistemas Complejos**

El concepto de emergencia no es nuevo y de hecho existen en la historia varias construcciones conceptuales en referencia al “todo antes que las parte” para indicar y explicar

fenómenos en términos de comportamiento global en vez de comportamientos locales, como por ejemplo ciertos elementos de la filosofía holística Aristotélica [2] o bien en la “Gestalt” [3], donde se habla de configuraciones o patrones de elementos que unificados en un todo no pueden ser descritos meramente como la suma de sus partes.

No obstante el concepto emergencia en sí, el cual incluye el concepto de construcción dinámica en el tiempo y no de entidades coherentes pre-configuradas, se atribuye al filósofo inglés G. H. Lewes en el año 1875 [4]. Lewes siguiendo el pensamiento del filósofo John Stuart Mill, argumentó que ciertos fenómenos en la naturaleza producen lo que él llamó una “novedad cualitativa”, i.e. cambios materiales que no pueden expresarse en términos cuantitativos simples, ya que son “emergentes” en vez de “resultantes”:

“(...) although each effect is the resultant of its components, we cannot always trace the steps of the process, so as to see in the product the mode of operation of each factor. In the latter case, I propose to call the effect an emergent . It arises out of the combined agencies, but in a form which does not display the agents in action (...).”

Actualmente existen cuatro escuelas principales de investigación que influyen la manera en que la emergencia se estudia dentro del campo de los sistemas complejos [5]:

- Teoría de los sistemas complejos adaptativos: donde se utiliza el término emergencia para referirse a los patrones en un nivel macro que surgen a partir de agentes que interactúan entre si en un nivel micro (Santa Fe Institute) [6].
- Teoría de los sistemas dinámicos no-lineales y teoría del caos: donde se promulga el concepto central de atractores y repulsores, i.e. comportamientos específicos hacia los cuales evolucionan los sistemas. Una clase de atractor es el atractor extraño el cual se considera también como fenómeno emergente ya que sus propiedades no son deducibles, predecibles o reducibles de las condiciones o factores antecedentes [7].

- La escuela de la sinérgica: la cual surge entre otras cosas para estudiar la emergencia dentro de los fenómenos físicos (Haken [8]) y sociales (Weidlich [9]). Éstos describen la idea de un parámetro de orden el cual influencia la manera en que se muestran los fenómenos coherentes a un nivel macro.
- Termodinámica lejos del equilibrio: la cual se introdujo a partir de Prigogine y Nicolis y se refiere a las maneras en que los fenómenos emergentes surgen como estructuras disipativas en condiciones lejos del equilibrio termodinámico [10][11].

Resumidamente, el concepto de emergencia tangencial que unifica la diversidad de aproximaciones anteriores se refiere a dos características básicas: un comportamiento global que surge de las interacciones de las partes locales y un comportamiento global que no se puede reducir al de las partes individuales.

Para un análisis más extenso sobre la historia y los usos actuales del término emergencia y sobre cuestiones ontológicas, de causalidad y de predictibilidad se puede consultar [12][13][14]. A partir de aquí adoptaremos entonces, por quorum bibliográfico y capacidad de síntesis, la definición de Goldstein [15] en la que se refiere a la emergencia como:

**El surgimiento de estructuras, patrones y propiedades novedosas y coherentes durante los procesos de auto-organización en los sistemas complejos.**

En lo que se refiere al concepto de auto-organización Goldstein lo define de la siguiente manera:

**La auto-organización es un proceso dinámico y adaptativo donde los sistemas adquieren y mantienen estructuras por ellos mismos sin ningún tipo de control externo.**

Las estructuras puede ser espaciales, temporales o bien funcionales [16]. El hecho de que no tengan un control externo se refiere en la definición a la ausencia de dirección,

manipulación, inferencia o de presión que involucre a un sistema externo. Esto incluye entradas de información (materia/energía) desde el exterior del sistema mientras estas entradas no sean instrucciones de control. Debido a esto último es importante la identificación de los contornos de un sistema para decir cuando un sistema es auto-organizado y a la vez para concretar lo que se entiende como control externo y lo que no; cuestiones que tradicionalmente se han investigado desde el campo de la termodinámica.<sup>11</sup>

Así, tomando como marco de referencia estas últimas definiciones de emergencia y auto-organización, nos podemos preguntar cómo se pueden transponer y redefinir dentro del ámbito sonoro y auditivo los conceptos de propiedad, estructura y patrón adscritos a éstas.

### 1.2. Propiedades Sonoras y Auditivas

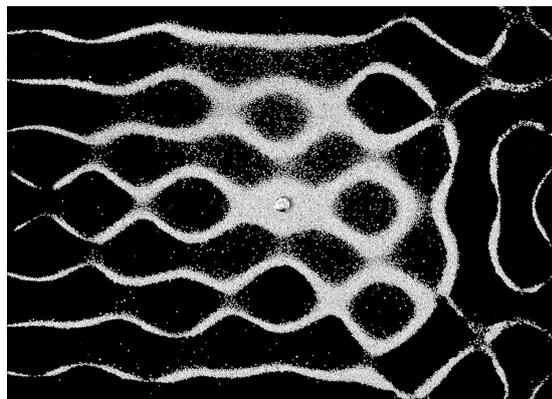
Para empezar a entender como se puede definir el primer concepto de propiedad dentro del marco sonoro y auditivo se puede primeramente separar entre las propiedades del sonido físico en sí, las cuales podemos denominar como propiedades sonoras, y las propiedades relativas a la percepción de ese sonido, las cuales podemos denominar como propiedades auditivas.

El sonido entendido a través de los conceptos de presión y tiempo conforma la noción de onda de sonido, la cual se propaga en un medio desde una fuente que lo genera hacia los oídos. Estas ondas de sonido se simplifican en su definición a través de una descripción en términos de ondas planas sinusoidales, las cuales se caracterizan por las siguientes propiedades: frecuencia o su inverso que es el periodo, amplitud, que viene a ser la intensidad o la presión sonora, la velocidad del sonido y la dirección de éste (Figura 2.6). Dentro del rango del oído humano se pueden percibir frecuencias aproximadamente en el intervalo

---

<sup>11</sup>Termodinámicamente un sistema cerrado puede intercambiar energía (calor o trabajo) pero no materia con su ambiente. Un sistema aislado no puede intercambiar ni energía ni materia. Un sistema abierto puede intercambiar tanto energía como materia [17].

Desde la mecánica cuántica la ecuación de Schrödinger's describe el comportamiento de un sistema cuántico aislado o cerrado que por definición no intercambia información con otro sistema [18]



(a) Placa de Chladini donde se observan patrones sinusoidales formados por una sustancia granular sobre una superficie plana vibrando en un modo propio.

HARMONIC MOTIONS.

28. THE vibrations expressed by a circular function of the time and variously designated as *simple*, *pendulous*, or *harmonic*, are so important in Acoustics that we cannot do better than devote a chapter to their consideration, before entering on the dynamical part of our subject. The quantity, whose variation constitutes the 'vibration,' may be the displacement of a particle measured in a given direction, the pressure at a fixed point in a fluid medium, and so on. In any case denoting it by  $u$ , we have

$$u = a \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau} - \epsilon\right) \dots\dots\dots (1),$$

in which  $a$  denotes the *amplitude*, or extreme value of  $u$ ;  $\tau$  is the *periodic time*, or *period*, after the lapse of which the values of  $u$  recur; and  $\epsilon$  determines the *phase* of the vibration at the moment from which  $t$  is measured.

(b) Extracto del segundo capítulo del libro Teoría del Sonido Vol.I, de Lord Rayleigh, 1877 [20], donde se observa la fórmula con la función cosinusoidal.

**Figura 1.2:** Función sinusoidal, percibida geoméricamente a través de una representación experimental y a partir de su descripción matemática.

de los 20 Hz a los 20.000 Hz y existen 6 maneras experimentales a partir de las cuales el sonido se puede analizar: altura (*pitch*), duración, sonoridad, timbre, textura sonora y localización espacial [19].

De esta manera cualquier fenómeno emergente y auto-organizado dentro del dominio sonoro y del campo auditivo, independientemente del tipo de estructura o patrón que adquiera dinámicamente, se podría en principio analizar suficientemente a partir de estas últimas propiedades.

### 1.3. Categorías Sonoras

Antes de entrar a explorar los otros conceptos de estructura y patrón desde el punto de vista de los fenómenos sonoros es conveniente focalizarnos en otra propiedad del sonido, la cual se deriva de la naturaleza y el origen de la fuente sonora en sí.

Generalmente en la categorización de sonidos se habla de “sonidos ambientales” para referirse a “todos los sonidos que ocurren naturalmente además del habla y de la música” [21]. La categorización forma parte de un proceso cognitivo relevante para entender có-

mo los oyentes interpretan los sonidos ambientales y cómo forman categorías a través de distintas propiedades de éstos. Estudios experimentales basados en tareas de clasificación perceptual muestran como los participantes de dichos experimentos utilizan diferentes tipos de similaridad para agrupar los sonidos. Un punto de partida relevante en la literatura psicoacústica es el estudio de Gaver [22] donde se propone una taxonomía del sonido basada en las interacciones simples del sonido. En este estudio se hipotetizan dos modos de escucha: una “escucha musical” que sucede cuando un oyente se focaliza solamente en las propiedades del sonido (i.e., el oyente describe las cualidades perceptuales acústicas) y una “escucha del día a día”, que es la que sucede cuando el oyente se focaliza en la causa del sonido. Un oyente puede utilizar ambos modos de escucha para un mismo sonido, tanto desde el punto de vista de sus atributos como de los eventos que lo causaron. En otros estudios experimentales posteriores [23] se identifican tres propiedades reportadas por los participantes al describir un sonido: las propiedades acústicas del sonido, las propiedades causales de la fuente del sonido y las propiedades semánticas relacionadas con la interpretación de la fuente.

Como marco de referencia para crear un principio de clasificación de los sonidos ambientales se pueden utilizar tres niveles de abstracción jerárquicos: superordinado, básico y subordinado [24]. En el nivel básico se identifica una acción del sonido, en el subordinado se identifica la fuente y en el superordinado se identifica la producción abstracta, tal como sonidos mecánicos, electrónicos, etc [25]. Incluyendo rasgos sonoros más allá de las categorías acústicas otros estudios muestran otro tipo de categorizaciones, en las cuales las fuentes de sonido (animadas e inanimadas), las acciones y los movimientos que causan los sonidos se pueden clasificar en función de:

- El contexto, localización donde el evento sucedió o lugar donde se puede percibir el sonido [26].
- El significado asociado con la identificación de la fuente de sonido como concepto funcional y abstracto [27].

- Las respuestas emocionales a la escucha del sonido [28].

Finalmente una buena aproximación para una división sonora es el mapa taxonómico con estructura jerárquica de Gaver [22]. La primera división en éste corresponde a la idea de que cada sonido involucra la interacción con diferentes tipos de materiales: líquido, sólido o gas. La primera clase corresponde a la de los objetos vibratoriales sólidos, la segunda a los sonidos aerodinámicos gaseosos y la tercera a los líquidos, tales como una gota cayendo en un vaso.

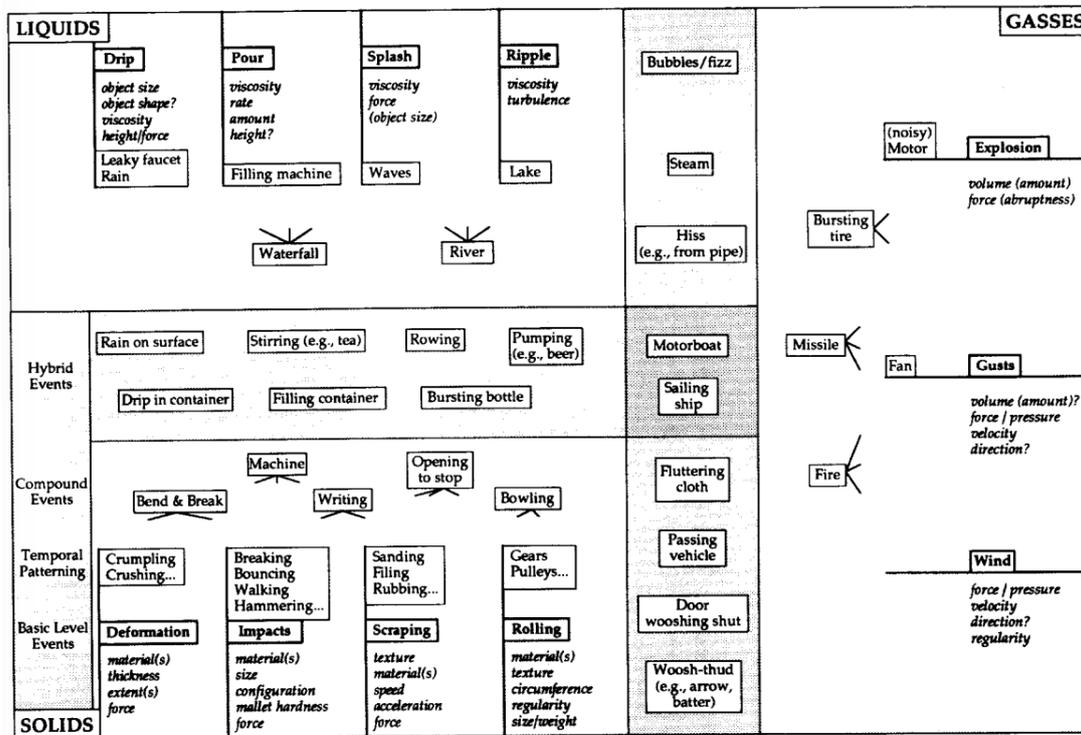


Figura 1.3: Mapa de sonidos del día a día. Dentro de cada sección se muestran en negrita los eventos productores de sonido, y sus atributos relevantes en itálica. La complejidad va en aumento hacia el centro de la figura, donde se muestran ejemplos de sonidos con patrones temporales, compuestos y híbridos. Las palabras asociadas a un signo de interrogación corresponden a categorías o atributos aún bajo cuestionamiento.

Desde un punto de vista físico se puede presuponer que el sonido es producido por casi cualquier fenómeno o proceso dinámico. Así por ejemplo, dentro de la escala cuántica de la materia, y en concreto dentro del campo de estudio de la física del estado sólido y de los superfluidos, se definen las vibraciones fundamentales a través del concepto de fonón

[29]<sup>iii</sup>. Estas partículas elementales (o más bien cuasi-partículas o excitaciones colectivas), las cuales se pueden clasificar dentro del modelo estándar de física de partículas como bosones, de la misma manera que los fotones, son las encargadas de mediar el cuanto de sonido tal como se ha visto en experimentos recientes de interferometría realizados con iones fríos [30]. De esta manera podemos conjeturar que cualquier vibración *ex nihilo* que se transmita en un medio y a cualquier escala de descripción espacial conforma una fuente sonora susceptible a ser percibida <sup>iv</sup>. <sup>v</sup>.

Más allá de los sonidos generados por los elementos naturales abióticos (inanimados), existen los sonidos bióticos (animados) de origen biológico producidos diversamente por órganos específicos en diversas especies tales como en anfibios, pájaros y mamíferos terrestres y marinos. En algunas especies estos sonidos producen fraseos, canciones o bien un habla. En muchas especies la percepción del sonido va íntimamente relacionada con finalidades apareamiento, de detección de peligro, navegación, depredación y de comunicación.

La bioacústica, como disciplina transdisciplinar, combina la biología con la acústica para investigar la producción, la dispersión y la recepción de sonido en animales. Dentro de la bioacústica se analizan sonidos más allá de la percepción humana. Por ejemplo en los saltamontes longicornios nocturnos (*Tettigoniidae*) los cuales se comunican con sonidos a frecuencias mayores de los 100 kHz dentro del rango ultrasónico [32]. A menor frecuencia, pero aún dentro del rango ultrasónico, los murciélagos utilizan el sonido para

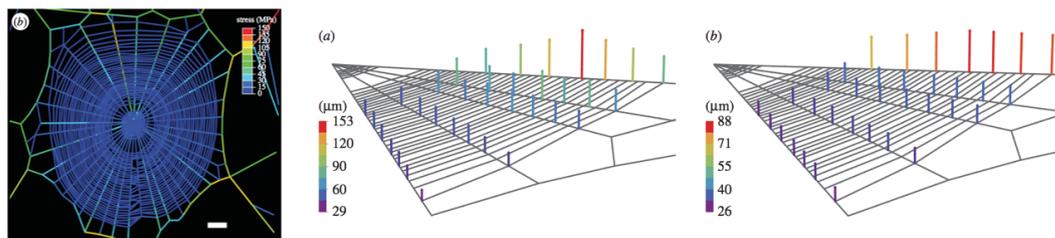
---

<sup>iii</sup>A temperaturas bajas, dependiendo de la forma de interacción entre átomos, se forman estructuras de cristales o bien de superfluidos. En éstos las únicas excitaciones de baja energía posibles son movimientos colectivos de los átomos. En la teoría cuántica todas las ondas corresponden a partículas y la partícula que corresponde a la onda de sonido es el fonón.

<sup>iv</sup>Cualquier fluctuación oscilatoria de un estado cuántico fundamental corresponde a una cuasi-partícula después de cuantizarla. No obstante una onda de sonido en el aire no corresponde a ninguna cuasi-partícula y esto es debido a que una onda de sonido no es una fluctuación alrededor de ningún estado fundamental cuántico y por lo tanto no es ninguna fluctuación por encima de un estado fundamental.

<sup>v</sup>Desde una descripción clásica normalmente se dice que las ondas de sonido no transportan masa y que sí transportan momento y energía. No obstante experimentos recientes demuestran que de hecho las ondas de sonido sí acarrear masa - masa gravitatoria concretamente [31]. Esto implica que éstas no tan solo son afectadas por la gravedad sino que también generan un pequeño campo gravitatorio negativo (y que por lo tanto en presencia de un campo gravitatorio como el terrestre estos fonones tienden a moverse hacia arriba!).

la ecolocalización [33]. En el otro extremo del espectro frecuencial hay vibraciones de baja frecuencia (estudiadas dentro del campo de estudio de la biotremología), las cuales dentro del reino animal no se detectan normalmente a través de órganos específicos del oído sino a través de órganos menos especializados. Como ejemplo de éstos últimos se encuentran las vibraciones terrestres producidas por los elefantes [34] que utilizan para comunicarse a grandes distancias; las vibraciones de la rana arborícola de labio blanco del Caribe (*Litoria infrafrenata*), la cual utiliza comunicación “sísmica” conspicua cuando está medio enterrada en el barro y lo golpea emitiendo vibraciones [35] o ya finalmente en el caso de las arañas, las cuales utilizan sus telarañas tanto para capturar a sus presas como para percibir y transmitir información a través de éstas [36].



**Figura 1.4:** Propiedades mecánicas y de propagación de ondas de vibración longitudinales y transversales en telarañas. En experimentos se utilizan métodos de interferometría láser Doppler para determinar las correlaciones presentes entre la presión de la seda y la velocidad del sonido en ésta [36].

Otro ejemplo, ya dentro del rango audible humano, dentro del campo de estudio de la ornitología es el de la vocalización en los pájaros. En esta disciplina se suele diferenciar el uso del término “canción” para designar vocalizaciones relativamente complejas y extensas y el término de “llamado” para expresar vocalizaciones sencillas. Esta distinción se basa también en el contexto, ya que las primeras se asocian con finalidades de cortejo y apareamiento y las segundas con finalidades de alarma o para mantener a miembros de la parvada en contacto [37]. El hecho de que estos sonidos sean considerados como un “habla” dentro de un lenguaje es ampliamente discutido, ya que un lenguaje a parte de palabras requiere una gramática, i.e. reglas y estructuras. De la misma manera se ha

especulado que para que un sistema comunicacional se pueda considerar como lenguaje éste tiene que ser combinatorio, i.e. contenga un conjunto de frases abierto construido a partir de un vocabulario finito [38].

En el caso concreto de los sonidos antropogénicos, los conjuntos de secuencias sonoras generadas fisiológicamente por la lengua, los labios y los órganos vocales, conforman un lenguaje a través de unidades fonológicas con finalidades comunicacionales sociales. Este lenguaje además está sujeto a ser generado, registrado, transmitido y difundido a través de dispositivos tecnológicos.

Por otro lado el habla humana es a la vez una construcción cultural de igual forma que lo es la música. De esta manera toda la música está compuesta de sonido pero no todo el sonido es música ya que existen cualidades diferentes entre los niveles perceptual, físico y estético del sonido. Así se puede entender que algunos sonidos pueden devenir sonidos procesados a nivel perceptual y algunos sonidos procesados pueden devenir música [39].

Concretando finalmente, podemos de esta manera clasificar el origen de las fuentes sonoras en dos categorías principales, una la del sonido de origen físico abiótico y otra la del sonido biológico, antropogénico y biogénico, el cual se puede englobar dentro de un lenguaje o proto-lenguaje comunicacional.

### 1.4. Estructuras y Patrones Sonoros

Siguiendo con el discurso y para continuar buscando modos de emplazar los fenómenos sonoros dentro del marco de los sistemas complejos, cuando hablamos del surgimiento de estructuras emergentes durante los procesos de auto-organización podemos entender por lo común que existe un proceso de disposición y orden de las partes dentro de un todo.

Dentro del ámbito visual, predominante en la percepción de dichas estructuras, se entiende que esta disposición y orden se refieren mayormente al dominio espacial. Dicha organización espacial se puede observar cuando componentes de un grupo abiótico o biótico se ordenan en el espacio en una modalidad no aleatoria. Un ejemplo instructivo por

autonomasia es el de las dunas de arena, donde surgen formaciones ondulatorias después de que una gran cantidad de partículas interactúen entre si por el viento [40]<sup>vi</sup>.



**Figura 1.5:** Dunas de arena en el planeta Marte. Diferencias en la velocidad del viento, la gravedad y la presión atmosférica pueden generar diferentes formas en las dunas.

El hecho de que esta formación espacial sea de carácter no aleatorio nos remite al concepto de patrón. Forma y patrón son en general conceptos no triviales de definir rigurosamente dentro de las matemáticas. Los patrones involucran elementos repetidos o regularidades en el espacio mientras que las formas son figuras características a la que se adscriben una clase de objetos. Por otro lado los patrones se extienden en el espacio mientras que las formas son finitas y están limitadas.

Igualmente se puede agregar otro concepto relacionado al de forma y patrón: la simetría. Ésta adquiere dos connotaciones: en un sentido significa algo bien proporcionado, bien balanceado y en otro una concordancia de distintas partes que integran un todo. Según Hermann Weyl [42] ésta, ya se defina su significado más estrecha o ampliamente, “es una idea mediante la cual el hombre a a través de los tiempos ha intentado comprender y crear orden, belleza y perfección”. En esta línea uno de los ejemplos paradigmáticos de simetría, rotacional en este caso, lo conforma el círculo en el plano y la esfera en el espacio. Estos objetos eran considerados por los Pitagóricos la figura geométrica más perfecta y así Aristóteles adscribía forma esférica a los planetas, ya que ninguna otra figura era igual de perfecta celestialmente.

En esta dirección y volviendo a citar a Weyl vemos un atisbo histórico de transposición

---

<sup>vi</sup>Existe un modelo sencillo de autómatas celulares creado por Brad Werner [41] el cual permite crear la mayoría de las características morfológicas de la dunas eólicas. Se puede consultar en <http://smallpond.ca/jim/sand/dunefieldMorphology/index.html>



**Figura 1.6:** Piedra del Sol o Calendario Azteca. Se puede observar aparte de la simetría rotacional, la simetría especular que parte del centro de la cara de Tonatiuh, dios náhuatl del Sol.

de la simetría del plano visual al sonoro:

“*Beauty* is bound up with symmetry. Thus Polykleitos, who wrote a book on proportion and whom the ancients praised for the harmonious perfection of his sculptures, uses the word, and Dürer follows him in setting down a canon of proportions for the human figure. In this sense the idea is by no means restricted to spatial objects; the synonym “harmony” points more toward its acoustical and musical than its geometric applications.”

Retornado a las definiciones formales, matemáticamente la simetría se puede entender como el número máximo de transformaciones posibles sin cambiar un evento en general, y una forma dentro del dominio espacial<sup>VII</sup>. Como ejemplo podemos pensar en una burbuja esférica de agua y jabón con una simetría rotacional completa, la cual es el resultado promedio generado por el movimiento aleatorio de una gran cantidad de partículas. En este caso una aleatoriedad completa genera una simetría en el objeto, sin embargo los patrones y las formas que tendemos a categorizar como tales son el resultado de una ruptura de simetría<sup>VIII</sup>.

---

<sup>VII</sup>Formalmente un objeto es simétrico respecto a una operación matemática si el resultado de aplicar esa operación o transformación del objeto el resultado es un objeto indistinguible en su aspecto al objeto original.

<sup>VIII</sup>Aún así la simetría que existe en un patrón formada a través de una fuerza de ruptura de simetría

La forma esférica perfecta de la burbuja de jabón sigue reglas deterministas de tal manera que si se crean unas reglas para construir una esfera ( $S^2$  en el espacio euclideo) y se siguen aplicando esas reglas se obtiene invariablemente la misma esfera todo el tiempo. No obstante también se pueden construir formas a través de procesos aleatorios no deterministas. Tal es el caso por ejemplo del caminante aleatorio, en el cual se traza un camino si en cada paso uno se desplaza una determinada longitud en una dirección aleatoria del espacio<sup>ix</sup>. Más allá de este proceso en particular existen muchos otros tipos de objetos geométricos aleatorios tales como las superficies bidimensionales aleatorias (terrenos donde las alturas de los picos y los valles son aleatorias)(Figura 1.7), los mapas aleatorios (colecciones de puntos aleatorios unidos por líneas) o los autómatas celulares asíncronos o estocásticos (Figura 1.8) por mencionar algunos. Ninguna de estas formas mencionadas es idéntica a si misma cuando se vuelven a generar, aún así, se ha demostrado matemáticamente que estos procesos aleatorios convergen hacia ciertas formas canónicas en algunos casos. Por ejemplo, el caminante aleatorio converge al movimiento browniano mediante el teorema del límite central<sup>x</sup>. La identificación de estas formas canónicas es un campo de investigación activo en matemáticas, tal como en la teoría de percolaciones, la cuál tiene relevancia en modelos de la física estadística tales como en el modelo de Ising en el plano [43].

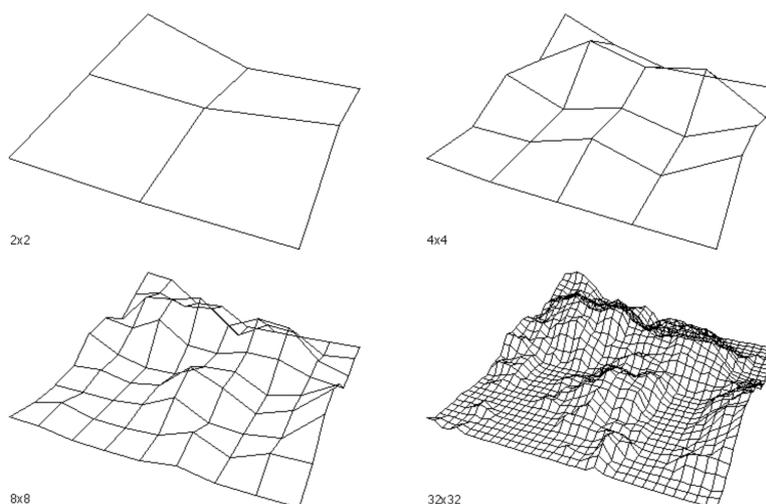
En esta dirección y dentro de la teoría de percolaciones, se ha encontrado recientemente una manera de construir formas, las cuales se asemejan a un diseño parecido de tablero de ajedrez organizado aleatoriamente donde además las retículas de éste también se construyen aleatoriamente a partir de triangulaciones (Figuras 1.9a,1.13b). La cuestión,

---

no siempre refleja la simetría de la fuerza en si. Como ejemplo se pueden citar las celdas de convección hexagonales de Benard-Rayleigh en un sistema homogéneamente calentado.

<sup>ix</sup>La caminata aleatoria, abreviada en inglés como RW (Random Walk), es una formalización matemática de la trayectoria que resulta de hacer sucesivos pasos aleatorios. Formalmente se puede definir a partir de  $X(t)$ , una trayectoria que empieza en la posición  $X(0) = X_0$  y siguiendo la siguiente expresión:  $X(t + \tau) = X(t) + \Phi(\tau)$ , donde  $\Phi$  es la variable aleatoria que describe la ley de probabilidad para tomar el siguiente paso y  $\tau$  es el intervalo de tiempo entre pasos subsecuentes.

<sup>x</sup>El movimiento browniano sin deriva es el caso límite del caminante aleatorio simétrico escojiendo  $\mu = 0$ .



**Figura 1.7:** Algoritmo de paisaje fractal. La idea detrás del algoritmo de sub-división espacial es sencilla, considerando un plano  $x - y$ : (i) dividir el cuadrado en una retícula de  $2 \times 2$ , (ii) perturbar verticalmente cada uno de los 5 nuevos vértices una cantidad aleatoria, (iii) repetir este proceso en cada uno de los nuevos cuadrados decreciendo la perturbación en cada iteración. <http://paulbourke.net/fractals/noise/>

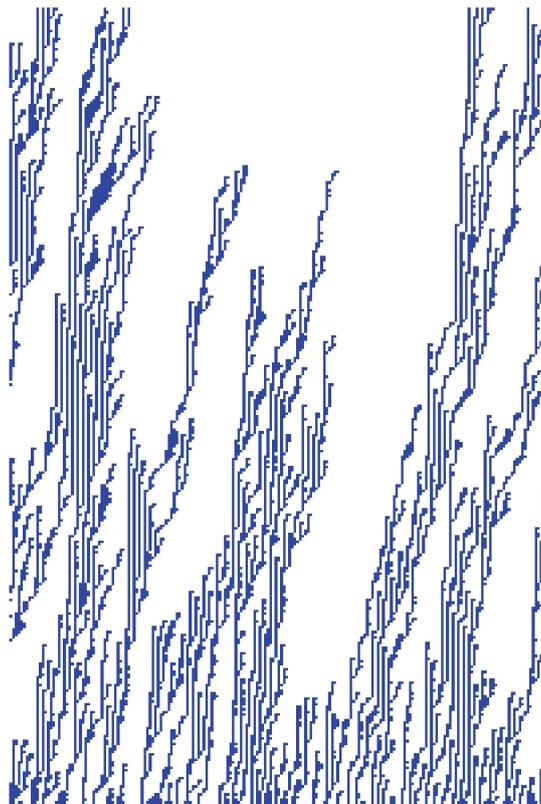
y sin entrar en detalles del proceso de construcción de dichas formas (consultar <sup>x1</sup> para una introducción pedagógica), es que esta doble aleatoriedad sin embargo no produce algo desorganizado sino más bien converge a formas universales.

Generalmente estos patrones pueden modelarse matemáticamente, y se puede afirmar inversamente en algunos casos que a partir de ciertos métodos algebraicos y analíticos, a través de la creación de diferentes espacios métricos, se puede encontrar *a posteriori* estructuras con las mismas propiedades geométrica de algunos patrones naturales <sup>xii</sup>. Estos patrones incluyen por lo regular a las simetrías (traslacionales y rotacionales), árboles, espirales, meandros, olas, espumas, teselaciones, grietas y rayas y puntos [46].

Para ir cerrando esta parte de descripción de patrones espaciales es oportuno remon-tarse a uno de los orígenes claves del pensamiento epistemológico occidental. Galileo, según el cual “Las matemáticas son el lenguaje con el que Dios ha escrito el Universo”,

<sup>x1</sup><https://www.quantamagazine.org/random-surfaces-hide-an-intricate-order-20190702/>

<sup>xii</sup>La topología algebraica es una rama de las matemáticas que utiliza herramientas de la álgebra abstracta para estudiar espacios topológicos, i.e. espacios definidos como un conjunto de puntos que cumplen ciertos axiomas entre ellos. Dentro de la topología algebraica la homología es una forma general de asociar secuencias de objetos algebraicos a espacios topológicos.

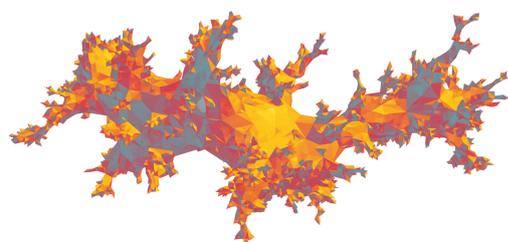


**Figura 1.8:** Autómata Celular (CA) Asíncrono tipo planta acuática. Un CA elemental es un CA binario uni-dimensional con comunicación entre células con primeros vecinos. Una de las maneras más sencillas de hacer de este modelo estocástico es utilizar el esquema de actualización  $\alpha$ -síncrono; éste actualiza la célula con una probabilidad  $\alpha$  y mantiene su estado con probabilidad  $1 - \alpha$ . Este CA en particular está construido a través de la Regla CA 148 [44].

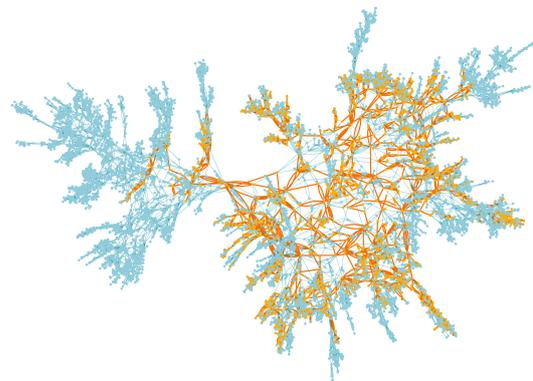
describe como la naturaleza:

«... está escrita en ese grandioso libro que continuamente está abierto a los ojos (me refiero al universo), pero no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua, y conocer los caracteres en los que está escrito. Este libro está escrito en lengua matemática, y los caracteres son triángulos, círculos, y otras figuras geométricas, sin las cuales es imposible entender ni una palabra; sin ellos es como girar vanamente en un oscuro laberinto».

Por otro lado Galileo se plantea, a propósito de las observaciones telescópicas de las irregularidades en la superficie de la luna (aplicando la ironía en su lenguaje sobre la



(a) Una superficie aleatoria construida a través de la unión de triángulos.



(b) Un mapa de los vértices de una superficie aleatoria, con el cluster mayor resaltado en naranja .

**Figura 1.9:** Superficies aleatorias. O. Bernardi, et.al. [45] demuestran como superficies aleatorias como estas se puede utilizar para revelar patrones universales profundos.

antigua manera de pensar en su época) [47]:

«¿Acaso las formas geométricas regulares son más nobles, más perfectas que las formas naturales empíricas, accidentadas, etcétera?»

La luna “montuosa, rugosa, áspera, desigual” se confronta, de la misma manera en que hemos descrito con anterioridad, con los patrones naturales y las idealizaciones matemáticas simétricas de ciertas formas geométricas.

Siguiendo en esta dirección y para ir encaminándonos hacia la descripción en términos temporales del surgimiento de patrones, nos acercamos ahora a la dicotomía entre lo simétrico - estático y el patrón - dinámico, a partir de otra cita, una de las más bellas de Galileo, que tiene como punto de partida la Tierra como objeto con alteraciones, mutaciones y generaciones :

« No puedo oír sin gran asombro y, diría, sin gran repugnancia de mi intelecto, que se atribuya a los cuerpos naturales que componen el universo, como título de gran nobleza y perfección, el ser impasibles, inmutables, inalterables, etc., y por el contrario que se estime una grave imperfección el hecho de ser alterables, engendrables, mudables, etc. Por mi parte, considero la Tierra muy noble

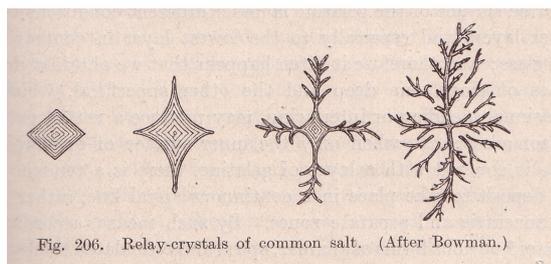
y muy digna de ser admirada precisamente por las muchas y tan diversas alteraciones, mutaciones, generaciones, etc., que en ella constantemente se producen y si no estuviera sujeta a ningún cambio, si sólo fuera un vasto desierto o un bloque de jaspe, o si, después del diluvio, al retirarse las aguas que la cubrían sólo quedara de ella un inmenso globo de cristal donde no naciera ni se alterase o mudase cosa alguna, me parecería una masa pesada, inútil para el mundo, perezosa, en una palabra, superflua y como extraña a la naturaleza, y tan diferente de ella como lo sería un animal vivo de un animal muerto, y lo mismo digo de la Luna, de Júpiter y de todos los otros globos del mundo [...]. Los que exaltan tanto la incorruptibilidad, la inalterabilidad, etc., creo que se limitan a decir esas cosas cediendo a su gran deseo de vivir el mayor tiempo posible y al terror que les inspira la muerte, y no comprenden que si los hombres fuesen inmortales, no hubieran tenido ocasión de venir al mundo. Estos merecerían encontrarse con una cabeza de Medusa que los transmutase en estatuas de jaspe o de diamante para hacerlos más perfectos de lo que son.»

Así, para eludir la posibilidad de ser atravesados por la mirada de un monstruo ctónico del inframundo, vamos a empezar a focalizarnos en el estudio temporal y mutable del surgimiento de las estructuras emergentes y auto-organizadas<sup>xiii</sup>.

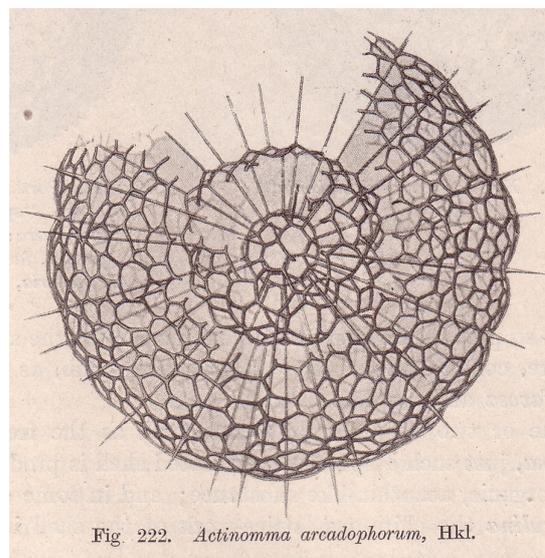
Uno de los primeros en aproximarse sistemáticamente al concepto de patrón y forma en la naturaleza desde una visión dinámica, y a través de una síntesis a partir de la biología, la historia natural, las matemáticas, la física y la ingeniería, fue el zoólogo Escocés D'Arcy Thompson en su libro "On Growth and Form" [48]. Thompson señala que, al menos en biología, la formación de patrones no es una cuestión estática sino más bien algo que surge a partir del crecimiento. De esta manera todo es lo que es porque llegó a ser de esa manera y así los enigmas de los patrones residen en el *cómo* llegaron a ser de esa forma.

---

<sup>xiii</sup>Aunque como señala desde la filosofía vitalista Henri Bergson: "We see that the intellect, so skillful in dealing with the inert, is awkward the moment it touches the living."



(a) Filamentación de un cristal de sal en un medio coloide.



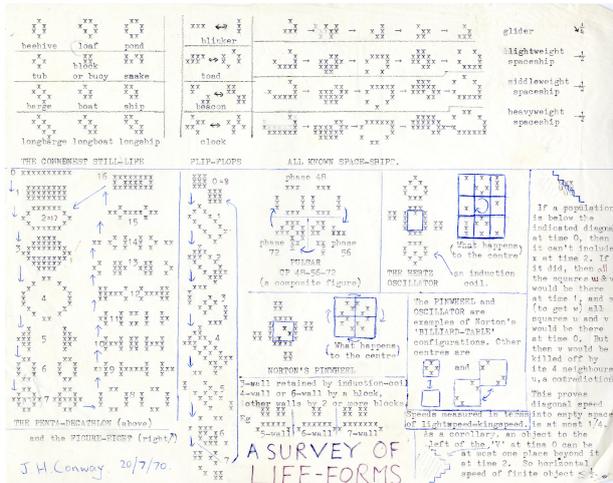
(b) Estudio geométrico de un esqueleto mineral de sílice de Radiolaria.

**Figura 1.10:** Figura del libro *On Growth and Form*. Libro fundacional de la disciplina de las biomatemáticas que ha inspirado a científicos, artistas y pensadores tales como Alan Turing, C H Waddington, Claude Lévi Strauss, Norbert Wiener, Henry Moore y Mies van der Rohe.

En esta dirección, que tiene un cuenta los caminos temporales en los que suceden los eventos, podemos definir algunos elementos característicos y propiedades de los fenómenos emergentes: **coordinación**, **correlación** y **coherencia** no presentes en las condiciones antecedentes de los componentes por si solos. Un ejemplo de esta coherencia se puede ver en la diversidad de estructuras del “Juego de la Vida” (*Game of Life*) de Conway <sup>xiv</sup>[49] las cuales aparecen y se desplazan a través de distintas células con un determinado arreglo y perduran en el tiempo (Figura 1.11a). Por otro lado, la propiedad de coherencia en los sistemas emergentes, entendida como el mantenimiento de determinadas estructuras y propiedades en el tiempo, es una de las cualidades a partir de las cuales se tipifica a los fenómenos complejos como “mayores a la suma de las partes”.

Puntualizando desde una perspectiva sonora el surgimiento de patrones se distingue principalmente en el dominio temporal. La organización de ciertas propiedades sonoras

<sup>xiv</sup>(26 Diciembre 1937 – 11 Abril 2020, r.i.p.)



(a) Guía de formas de vida, de una carta de 1970 a Martin Gardner.



(b) Conway jugando al Game of Life en 1974.

**Figura 1.11:** Game of Life de John Horton Conway. Un autómatas celular es una pequeña máquina con grupos de células que evolucionan iteración tras iteración transformándose y cambiando de forma según reglas de nacimiento, muerte y supervivencia deterministas. Life se juega en una retícula donde las células proliferantes se asemejan a microorganismos vistos bajo un microscopio.

normalmente se dispone como la sucesión de eventos dentro del rango auditivo y en un orden cronológico sin tener en cuenta usualmente la disposición espacial de estos eventos. No obstante una propiedad inherente del sonido es su localización espacial, referente a la posición en el plano horizontal y vertical y a la distancia entre la fuente y la posición de escucha, junto con las características acústicas del ambiente sonoro del espacio [50]. De esta manera y para ser precisos podemos categorizar 4 tipos de eventos sonoros:

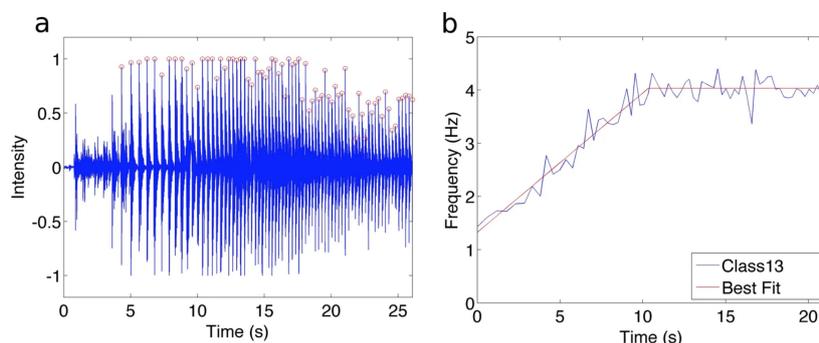
1. Eventos con propiedades estáticas en el dominio temporal.
2. Eventos dinámicos en el tiempo.
3. Eventos en los que la organización espacial del sonido es simple (una fuente sonora).
4. Eventos en los que hay múltiples fuentes sonoras distribuidas en el espacio.

Las posibilidades finales de permutación entre esta clase de eventos son:  $(1 \wedge 3 \vee 1 \wedge 4) \vee (2 \wedge 3 \vee 2 \wedge 4)$ . Normalmente dentro de los eventos sonoros naturales la combinación

más común es la  $2 \wedge 4$  ya que aunque la fuente sonora sea de una misma clase ésta se distribuye en múltiples fuentes distribuidas en el espacio. No obstante a veces se puede simplificar la dimensión espacial para entender un fenómeno complejo sonoro, como en el ejemplo paradigmático de sincronía colectiva “no-intencionada” en un unísono de aplausos de un grupo de personas, en el que la distribución espacial de los aplausos una vez se llega al estado síncrono se puede considerar como una única fuente sonora (Figura 1.12).

Existen varios ejemplos donde se muestra que a nivel individual los humanos (y algunas otras pocas especies) se involucran en comportamientos rítmicos y que son capaces de “arrastrar” colectivamente sus comportamientos para igualar estímulos equidistantemente separados o isocrónicos, como en el caso de los aplausos[51]. Más allá de esto existen experimentos psicológicos que muestran cómo el movimiento sincronizado entre individuos tiende a difuminar el límite entre el “yo” y el “otro”, reforzando las relaciones sociales e incrementando la cooperación entre un grupo [52]. Similarmente estudios antropológicos de campo han observado en eventos sociales con grupos de varias personas cómo la sincronía física conlleva a sentimientos de “sentirse uno con la comunidad” o de “efervescencia colectiva”, como en el caso de las danzas rituales en Andaman Islanders [53], en las festividades de los carnavales en la calle [54], o en las “raves” de música electrónica [55].

Otro ejemplo de emergencia acústica importante de reseñar, dentro del dominio biológico no antropogénico, es el de los insectos tales como los grillos, los saltamontes o los *Katydid*s (dentro del grupo de los Orthopteros). Éstos producen sonido a través de un mecanismo de estridulación, i.e. mediante estructuras corporales estriadas y afiladas y estructuras asociadas a éstas que vibran al ser frotadas a través del plectro esclerotizado [56]. Dentro de los insectos que generan señales acústicas normalmente los machos son los que disponen de un mecanismo de llamado, el cual genera señales que transmiten información sobre la identidad de la especie, el sexo, la locación, o incluso cualidades conspicuas a ciertos receptores. Los machos en algunas especies de insectos generan señales en intervalos de tiempo variantes mientras que otros machos ajustan su propio ritmo referente al de sus vecinos conspicuos, lo cual conlleva al fenómeno de sincronía acústica. Estas señales

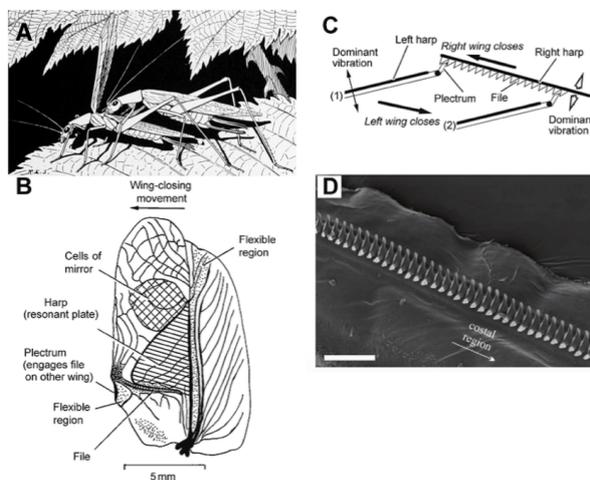


**Figura 1.12:** Experimentos recientes entorno al aplauso en colectivos. En este estudio [51] se muestra que en grupos (de dos a pocos centenares de personas) siempre se incrementa la frecuencia del aplauso y que en grupos mayores ésta incrementa más rápido. A partir de un modelo basado en un oscilador acoplado se recuperan las características experimentales en las que el incremento de la frecuencia está guiado por pequeños errores de temporalidad en los individuos y por las interacciones inter-individuales que ocurren para mantener el unísono.

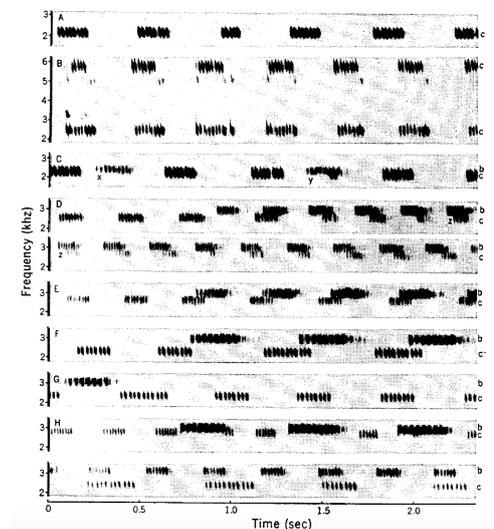
acústicas se pueden clasificar también de acuerdo a las respuestas que evocan en los receptores conspicuos: señales que son generadas en interacciones agresivas entre rivales (las cuales en la literatura se acuña como “canciones agresivas”) o bien “canciones de llamado” para atraer sexualmente a las hembras [57].

Para finalizar ya esta sección mostramos un último ejemplo de patrón sonoro (más controversial que los anteriores), dentro del dominio de los fenómenos abióticos en este caso. Varios reportes de astronautas desde vuelos tripulados atestiguan visualmente fenómenos de descargas de rayos en tormentas sobre la superficie de la Tierra formando diversos tipos de patrones. Un testimonio del astronauta Robert L. Gibson al sobrevolar la cordillera de los Andes señala:

I’ve just been coming over, in the past five minutes, an extensive area of thunderstorms. . . . There seems to be some sort of a collective organization to the lightning strikes which occur over a wide area. When one goes off, two or three may go off simultaneously, or that one may turn out to trigger a whole lot of other ones all over a very wide area—five hundred thousand square miles, perhaps. The lightning flashes then will go off, numerous ones—10, 20, 40, 50.



(a) Estructura morfológica funcional y mecanismos generadores de sonido en el grillo [58]



(b) Audio-espectrogramas de las canciones del grillo de árbol [59]

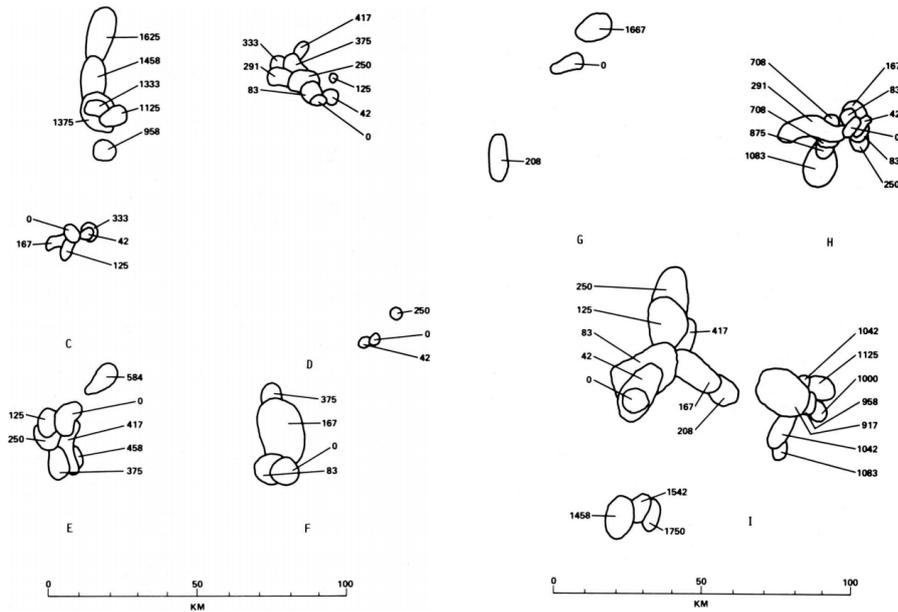
**Figura 1.13:** Sincronización en cantos de grillos. Las frecuencias normalmente pueden abarcar de 1 a 2 kHz hasta el rango ultrasónico y las señales pueden ser de banda ancha (*Katydid*s) o enmarcarse dentro de bandas de frecuencia más estrechas (la mayoría de grillos). La ventaja selectiva de utilizar uno u otro mecanismo para la transmisión y recepción de una señal en un ambiente con ruido se ha descrito en otros estudios [60].

It'd be calm again for about one to two seconds, then we'd get another period of—oh, maybe three, four, five maybe up to seven seconds or so of lightning going off in all locations. And it subsides; period of calm; then cycle through that again. A few things which impressed me here: one is the fact that they could go off simultaneously or near simultaneously over a large distance—sympathetic lightning bolts, if you will, analogous to sympathetic flares on the sun. And that we do get periods of calm between periods of very high activity. Some sort of collective phenomenon appears to be at work.

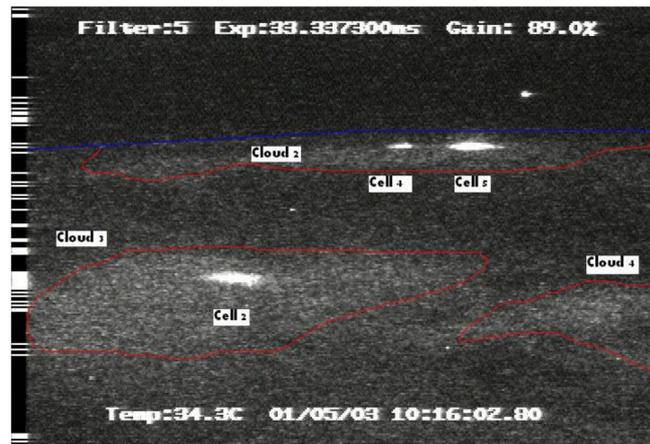
Un fenómeno similar fue reportado por Vonnegut et.al.[61] en los experimentos “Night-time/Daytime Optical Survey of Lightning” (NOSL), a bordo del programa espacial americano Space Shuttle. En estos se capta el agrupamiento y convergencia de destellos de rayos a partir de un análisis de vídeo y de observaciones de astronautas. Como explicación conceptual del fenómeno señalan cómo el lanzamiento de energía eléctrica en una porción de las nubes “detona” el desarrollo de un nuevo proceso de ruptura o desprendimiento eléctrico en otra parte de la nube. De la misma manera experimentos posteriores de análisis satelital evidencian una actividad eléctrica sincrónica en redes de tormentas espacialmente separadas [62].

Las descargas de rayos son una manera natural de neutralizar el efecto de acumulación eléctrica en las tormentas. De esta manera si una descarga individual destruye una fracción substancial de la nube, la probabilidad subsiguiente de un destello se reduce hasta que se reconstruye de nuevo la carga eléctrica de la nube [63]. El patrón temporal de la actividad de rayos en una región localizada puede entonces considerarse como una medida inherente a las escalas temporales del proceso físico de separación de carga y reacumulación de ésta.

La formación de estos patrones de rayos que los astronautas atestiguan visualmente desde fuera de la órbita terrestre, los habitantes dentro de las tormentas, a parte de a través de los destellos visuales, también captan el fenómeno mediante el sonido *in situ* que se desprende de éstos: el trueno, un fenómeno de organización que en este caso es percibido desde una modalidad sonora.

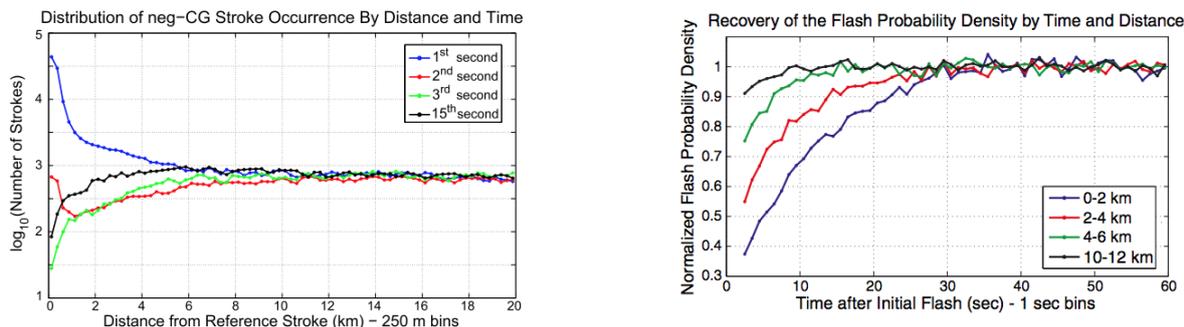


(a) Secuencias de rayos observadas por el astronauta Mattingly durante la misión STS-4.1. Se observan patrones espaciales en forma de Y. Los números indican los tiempos transcurridos entre la primera luminosidad observada.



(b) Un ejemplo más reciente de vídeo desde la nave Columbia en 2003, donde se observa un campo de rayos que muestra simultáneamente varios destellos. En esta captura de vídeo se muestran las células eléctricas activas.

**Figura 1.14:** Observaciones de rayos a bordo de misiones espaciales. Este tipo de observaciones se describen como fenómenos en los que células de tormentas espacialmente distantes parecen “encender” destellos de rayos en secuencias temporales semi-cíclicas. El rayo que ocurre en una célula sigue de inmediato a rayos de otras células separadas por decenas o cientos de kilómetros.



(a) El número de impactos como función de la distancia desde la fuente del impacto graficado separadamente para el primer, segundo, tercero y quinceavo. Datos del NLDN.

(b) La densidad de probabilidad de un destello en función del tiempo, parametrizado espacialmente a través de anillos concéntricos a la fuente. Datos del NLDN.

**Figura 1.15:** Datos de geo-localización de rayos provenientes del National Lightning Detection Network (NLDN) [63].

Los truenos son el sonido de la onda de choque generada por la rápida expansión y contracción del aire debido a los altísimos gradientes de temperatura que genera el rayo. Estas ondas de choque al poder ser percibidas auditivamente pueden considerarse colateralmente como un fenómeno de emergencia dentro del ámbito sonoro <sup>xv</sup>.

## 1.5. Medidas de Complejidad Sonora

En el apartado anterior hemos explorado, más o menos formalmente, diferentes fenómenos de organización espacial y temporal. En algunos de los ejemplos citados, la comprensión del patrón que emerge de ellos es comprensible y entendible directamente a través de la percepción sensorial del fenómeno detrás que lo genera. No obstante hay ciertos patrones en ciencia, matemática o incluso en el lenguaje que sólo son discernibles e identificables a través de ciertos análisis *a posteriori*. Estos análisis, en el caso del campo de investigación de los sistemas complejos, suelen incluir varias técnicas formales de medida de la aleatoriedad y del orden. En esta sección revisaremos algunas de éstas

<sup>xv</sup>Uno de los privilegios de habitar un lugar relativamente aislado acústicamente es el poder captar desde la casa ciertos fenómenos sonoros. Las secas en Ocotitlán traen la multiplicidad de insectos al oído y las lluvias, con sus apagones de luz, propician enfocar la atención y el oído a la electricidad que emana inversamente de los cielos. En este link se pueden consultar grabaciones de campo de estos fenómenos.

metodologías que nos van a servir como herramienta posterior para inspeccionar desde los datos empíricos algunas propiedades de los sistemas emergentes y auto-organizados.

Por otro lado, la multiplicidad de dominios del conocimiento y de fenómenos en los que aparecen propiedades emergentes dificulta de alguna manera encontrar medidas globales para cuantificarlos. Diferentes disciplinas conciben la complejidad de maneras y en sentidos diferentes, aunque no absolutamente divergentes entre sí. Por ejemplo, dentro del campo de la biología evolutiva la complejidad está relacionada con los organismos:

«Bacteria, for example, are probably no more complex than their ancestors 2000 million years ago. The most that we can say is that some lineages have become more complex in the course of time. Complexity is hard to define or to measure but there is surely some sense in which elephants and oak trees are more complex than bacteria, and bacteria than the first replicating molecules.»

(John Maynard Smith and Eörs Szathmáry [64]).

Dentro del campo del lenguaje, a través del concepto de gramática y de complejidad paradigmática:

«All languages have a complex grammar: there may be relative simplicity in one respect (e.g., no word-endings), but there seems always to be relative complexity in another (e.g., word-position)»(John McWorther [65]).

Desde otra perspectiva Feynman, en un poema, nos habla de la complejidad química de la cual emerge la consciencia:

«Deep in the sea  
all molecules repeat  
the patterns of one another  
till complex new ones are formed.  
They make others like themselves  
and a new dance starts.

Growing in size and complexity  
living things  
masses of atoms  
DNA, protein  
dancing a pattern ever more intricate.

Out of the cradle  
onto dry land  
here it is  
standing:  
atoms with consciousness;  
matter with curiosity.

Stands at the sea,  
wonders at wondering: I  
a universe of atoms  
an atom in the Universe.» (Richard Feynman [66])

Y finalmente desde otra poética y desde una perspectiva psicológica de la complejidad que apela al concepto de ambivalencia o de confusión de las emociones en el enamoramiento:

«Amar es pensar.  
Y yo casi me olvido de sentir sólo pensando en ella.  
No sé bien lo que quiero, incluso de ella, y no  
pienso más que en ella.  
Tengo una gran distracción animada.  
Cuando deseo encontrarla  
casi prefiero no encontrarla,

Para no tener que dejarla luego.

No sé bien lo que quiero, ni quiero saber lo que

quiero. Quiero tan sólo

Pensar en ella.

Nada le pido a nadie, ni a ella, sino pensar.» (Alberto Caeiro [67]).

Un pre-requisito para comparar la complejidad en diferentes objetos (biológicos, palabras, sentimientos) es, y aunque suene tautológico, poseer una manera para afirmar que un objeto es complejo. No obstante, a pesar de la multiplicidad de maneras de entender dicha complejidad, existe un ejemplo paradigmático de medida que se utiliza en varias disciplinas para cuantificarla: la entropía. Ésta se asocia comúnmente con la cantidad de orden, desorden o caos en un sistema termodinámico. Esta entropía vista desde el punto de vista de la física estadística<sup>xvi</sup> o de la teoría de la información se conforma como una función de estado que indica la cantidad de información necesaria para especificar un micro-estado<sup>xvii</sup> del sistema de manera completa. Así cuando un sistema está ordenado o alejado de un estado caótico, la cantidad de información para describirlo será menor que en el caso en el que esté completamente desorganizado<sup>xviii</sup>.

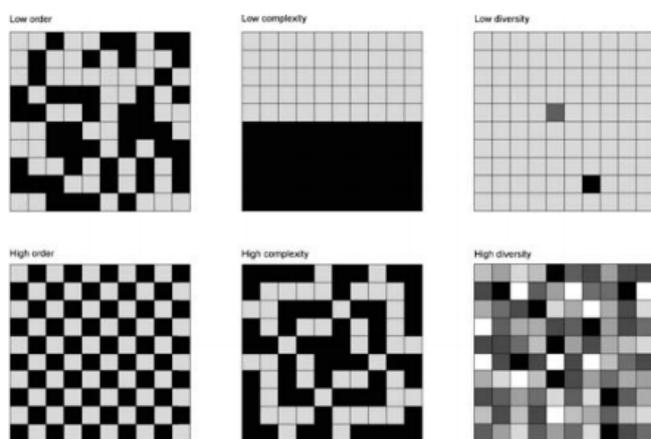
Igualmente por definición, la entropía cuantifica el desorden, y como consecuencia de esto cualquier medida de la complejidad puramente basada en estimaciones de la entropía asignará valores mayores a características que contengan una proporción mayor de aleatoriedad en ellas. Esta conexión directa entre entropía y aleatoriedad sin embargo no es plenamente satisfactoria en algunos contextos. Por ejemplo, la descripción en mecánica estadística de un gas es más sencilla que la de un líquido a pesar del hecho de que los movimientos moleculares son más desordenados en los gases que en los líquidos. En estos casos la aleatoriedad corresponde a una complejidad menor. Desde una perspectiva más

---

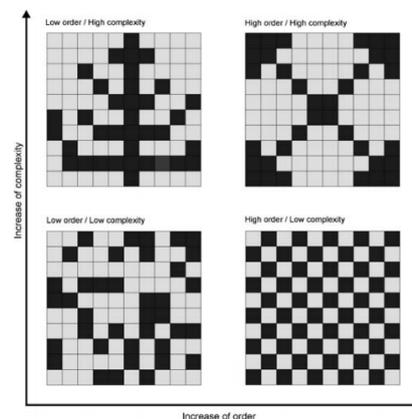
<sup>xvi</sup> $S = k_B \cdot \ln \Omega$ , donde  $S$  es la entropía,  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $\Omega$  el número de micro-estados posibles para el sistema ( $\ln$  es la función logaritmo natural).

<sup>xvii</sup>En mecánica estadística, un micro-estado es la especificación detallada de una configuración microscópica de un sistema termodinámico. En otros términos, un micro-estado es un punto del espacio de fases de dicho sistema.

<sup>xviii</sup>En apartados posteriores revisaremos más en detalle algunas medidas del orden y aleatoriedad en eventos sonoros a partir de teorías termodinámicas y entrópicas del sonido.



(a) Representación gráfica de la diferencia entre orden, complejidad y diversidad.



(b) Representación de sistemas con orden variable y complejidad variable.

**Figura 1.16:** Conceptos de orden, complejidad y diversidad entendidos a través de configuraciones espaciales en representaciones de matriz cuadradas.

amplia entonces las medidas de complejidad necesitan poder capturar este equilibrio entre organización y flexibilidad y diversidad y sistematicidad que diferencia por ejemplo a los seres vivos de la materia inanimada [68]<sup>xix</sup>.

Paralelamente, de la misma manera que se pueden utilizar diversos métodos matemáticos y estadísticos para concretar si una estructura visual conforma un patrón espacial ordenado o desordenado y más o menos complejo [69](Ver figura 1.16), dentro del dominio temporal una de las herramientas principales para obtener información sobre la preponderancia frecuencial de una señal sonora es la transformada de Fourier y otras medidas relacionados a ésta, tal como la medida de monotonía espectral o la entropía de Wiener. Esta última se usa en el procesamiento digital de señales para caracterizar el espectro de audio y proporciona una manera de cuantificar qué tan ruidosa es una señal opuestamente a un tono puro [70]<sup>xx</sup>.

Para ser más detallados y precisos en el uso de este tipo de herramientas vamos a

<sup>xix</sup>En sistemas fuera del equilibrio la complejidad se cuantifica balanceando la entropía, que crece a medida que un sistema se acerca al equilibrio, con el grado de no-equilibrio, el cual crece en dirección opuesta.

<sup>xx</sup>Aun así queda por validar la correspondencia entre la transposición perceptiva del patrón visual, como elemento espacial ordenado, al tono puro, como patrón sonoro ordenado en el tiempo.

emplear a partir de aquí el formalismo matemático global de los sistemas dinámicos y más en concreto el de las series de tiempo o series temporales.

A partir del formalismo de los sistemas dinámicos se pueden describir sistemas tanto abióticos como biológicos, reales o bien hipotéticos, y la evolución en el tiempo de diferentes propiedades inherentes a estos. Básicamente su descripción formal se conforma a partir de un conjunto de números reales los cuales delimitan un vector de estado. Este vector de estado describe la posición del sistema y su estado en lo que se denomina espacio de fases (conformado normalmente por las variables conjugadas  $p$ ,  $q$  dentro del formalismo hamiltoniano). La evolución temporal del vector de estado, que traza un conjunto de trayectorias contenidas en el espacio de fases, viene gobernada por una función o regla de evolución en el tiempo.

Como hemos descrito anteriormente, los sistemas dinámicos son sistemas compuestos que consisten en un conjunto de partes locales que interactúan de diferentes maneras entre sí. En el caso particular de un sistema complejo, dentro de un conjunto de sistemas dinámicos, el comportamiento global que generan colectivamente aparece como una novedad en relación a las interacciones locales de corto alcance entre sus elementos constituyentes.

No siempre es posible determinar en su completitud todos los componentes de un vector de estado de un sistema dinámico, no obstante hay maneras específicas dentro del campo de estudio de las series temporales que sirven para analizar una gran variedad de fenómenos a través de los cuales los sistemas dinámicos se manifiestan. En las series temporales se investiga la evolución de un determinado observable, i.e. una cantidad física medible, a partir de la secuencia cronológica temporal de puntos medidos normalmente a intervalos sucesivos y uniformemente espaciados en el tiempo.

Normalmente se puede clasificar la tipología de las series temporales en función de si son:

- Periódicas.
- Aleatorias.

- No periódicas pero correlacionadas.

Una manera de distinguir entre estos tres tipos de series de tiempo es a través de su potencia espectral correspondiente, la cual se define como el cuadrado de su transformada de Fourier.

En matemáticas y en física, la densidad espectral (*Spectral Density*, SD) de una señal o de una serie de tiempo es una función matemática que nos informa de cómo está distribuida la potencia o la energía (según el caso) de dicha señal sobre las distintas frecuencias sobre las que está formada.

En el caso de la energía para definir la densidad espectral de energía (*Energy Spectral Density*, ESD) partimos de la energía  $E(t)$  de una serie o señal  $x(t)$  la cual se define como

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt. \quad (1.1)$$

En el caso que esta integral se pueda calcular, i.e. sea convergente, entonces a partir del Teorema de Parseval obtenemos que <sup>xxi</sup>:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{x}(f)|^2 df, \quad (1.2)$$

donde

$$\hat{x}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi ift} x(t) dt, \quad (1.3)$$

es la transformada de Fourier de la señal y  $f$  es la frecuencia en Hertz. De esta manera la ESD se define para funciones continuas como:

$$S_{xx}(f) = |\hat{x}(f)|^2, \quad (1.4)$$

---

<sup>xxi</sup>En matemáticas, la Relación de Parseval demuestra que la Transformada de Fourier es unitaria; es decir, que la suma (o la integral) del cuadrado de una función es igual a la suma (o a la integral) del cuadrado de su transformada.  $\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\mathcal{F}[f(t)](\alpha)|^2 d\alpha$ , donde  $\mathcal{F}[f(t)](\alpha)$  representa la transformada continua de Fourier de  $f(t)$  y  $\alpha$  representa la frecuencia.

e igualmente podemos definir la densidad espectral de potencia (*Power Spectral Density*, PSD). En este caso podemos definir la potencia promedio  $P$  de una señal  $x(t)$  en el tiempo a través de la media temporal siguiente:

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt. \quad (1.5)$$

En un proceso estacionario<sup>xxii</sup>, por ejemplo tenemos una potencia finita y sin embargo una energía infinita. Debido a esto no se puede emplear en estos procesos la ESD.

Para analizar el contenido en frecuencias de una señal uno a veces, como hemos visto en el caso de la ESD, puede calcular la transformada de Fourier ordinaria  $\hat{x}(\omega)$ , sin embargo hay ocasiones en las que ésta no existe formalmente. Debido a esta complicación se puede no obstante trabajar con la transformada de Fourier truncada, la cual se integra sobre un período de tiempo  $[0, T]$ :

$$\hat{x}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_0^T x(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1.6)$$

de esta manera podemos definir la densidad espectral de potencia PSD como:

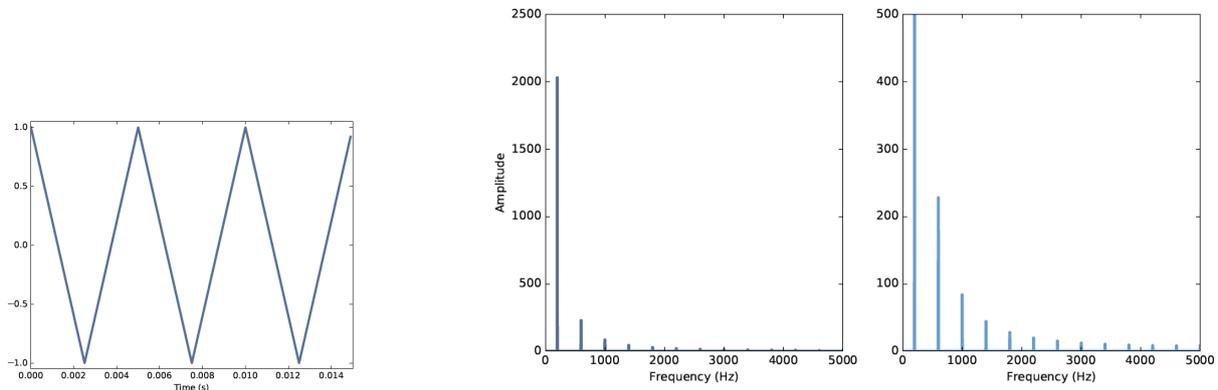
$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \mathbf{E} [|\hat{x}(\omega)|^2], \quad (1.7)$$

siendo  $\mathbf{E}$  el valor medio. La potencia espectral de una serie de tiempo periódica tiene un número discreto de picos, los cuáles indican cuales son las frecuencias predominantes de la serie. Por ejemplo podemos ver en la figura 1.17a la señal temporal de una onda triangular de 200Hz y su correspondiente PSD 1.17b, o espectrograma como suele abreviarse comúnmente.

Un pequeño inciso antes de continuar referente a las figuras anteriores. A lo largo de la tesis todo el corpus referente a procesamiento digital de señales de audio (*Digital*

---

<sup>xxii</sup>En matemáticas, un proceso estacionario (o proceso estrictamente estacionario) es un proceso estocástico cuya distribución de probabilidad en un instante de tiempo fijo o una posición fija es la misma para todos los instantes de tiempo o posiciones. En consecuencia, parámetros tales como la media y la varianza, si existen, no varían a lo largo del tiempo o la posición.



(a) Ejemplo de señal harmónica triangular de 200 Hz.

(b) Espectrograma y espectrograma ampliado para ver los armónicos de la señal triangular.

**Figura 1.17:** Señal triangular harmónica de 200 Hz y su respectiva PSD.

*Signal Processing*, DSP) y de series temporales está desarrollado en Python (2.7 o 3.7) y utilizando, entre otras librerías, `thinkDSP`<sup>xxiii</sup>. Sólo a modo de referencia y para ilustrar la metodología que seguiremos más adelante, se muestra a continuación el bloque de código (comentando) que se ha utilizado para generar las figuras 1.17a, 1.17b.

```

1 class TriangleSignal(Sinusoid): #la onda triangular es una subclase de
    la onda sinusoidal
2     def evaluate(self, ts): # evalua en la secuencia de tiempos ts de
    sampleo
3         cycles = self.freq * ts + self.offset / PI2 # numero de ciclos desde
    el tiempo inicial
4         frac, _ = np.modf(cycles) #rampa de 0 a 1
5         ys = np.abs(frac - 0.5) #atributos de amplitud
6         ys = normalize(unbias(ys), self.amp) #normaliza amplitudes
7         return ys #finaliza la secuencia y devuelve amplitudes
8
9 signal = thinkdsp.TriangleSignal(200) #crea la se al
10 signal.plot() # wave contiene un metodo de graficar a partir de pyplot
11

```

<sup>xxiii</sup><https://github.com/AllenDowney/ThinkDSP>

```
12 wave = signal.make_wave(duration=0.5, framerate=10000) #crea la onda a
    partir de la se al
13 spectrum = wave.make_spectrum() #de la onda crea el espectrograma
14 spectrum.plot() #grafica el espectrograma
```

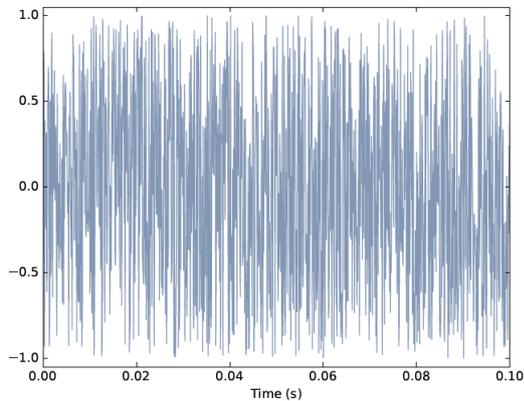
Específicamente para crear el espectrograma utilizando el método `make_spectrum` se utiliza la siguiente implementación a partir de la librería `npfft` de NumPy la cual permite calcular la transformada de Fourier discreta:

```
1 from np.fft import rfft, rfftfreq
2 # class Wave:
3     def make_spectrum(self):
4         n = len(self.ys) #numero de samples
5         d = 1 / self.framerate #inverso de framerate
6         hs = rfft(self.ys) #real fast fourier transform
7         fs = rfftfreq(n, d) #frecuencias de la transformada de fourier
8         return Spectrum(hs, fs, self.framerate)
```

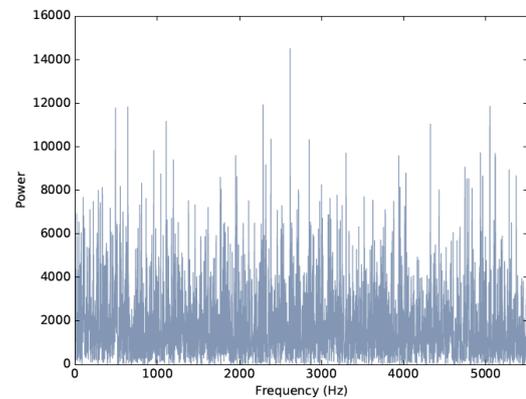
Si generamos ahora la PSD de una serie no harmónica como por ejemplo una serie temporal aleatoria, vemos que en ésta hay una estructura diferente a la de la señal triangular, ésta es continua y plana debido a que no existen frecuencias dominantes, i.e. todas las frecuencias están presentes a diferentes amplitudes espectrales. Una manera fácil para entender el ruido es generarlo, y una de las formas más sencillas es hacerlo a través del ruido uniforme no correlacionado (UU noise). Uniforme en este caso significa que las señal contienen valores aleatorios a partir de una distribución uniforme, i.e. cada valor en el rango es equiprobable. No correlacionado significa que los valores de la señal son independientes, i.e. conocer un valor en un punto del tiempo no provee información sobre los otros puntos.

Para generar 1.18a y 1.18b utilizamos:

```
1 class UncorrelatedUniformNoise(_Noise):
2     def evaluate(self, ts):
3         ys = np.random.uniform(-self.amp, self.amp, len(ts))
4         return ys
```



(a) Forma de onda del ruido uniforme no correlacionado.



(b) Espectrograma del ruido uniforme no correlacionado.

**Figura 1.18:** UU noise. La distribución de una señal aleatoria es el set de valores posibles y sus probabilidades, en este caso la valores oscilan en el rango -1 a 1 con la misma probabilidad.

```

5
6 signal = thinkdsp.UncorrelatedUniformNoise()
7 wave = signal.make_wave(duration=0.5, framerate=11025)
8 signal.plot()
9
10 spectrum = wave.make_spectrum()
11 spectrum.plot_power()

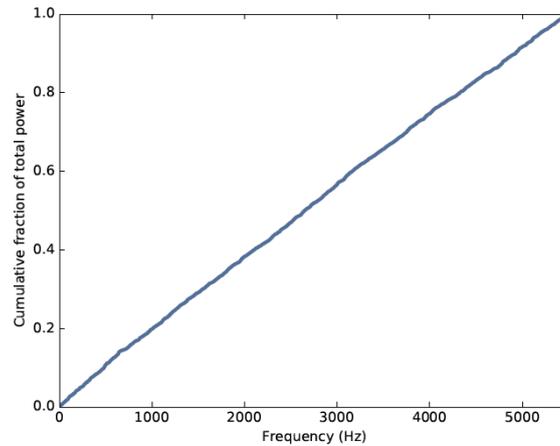
```

En el caso del ruido UU podemos observar la relación entre la potencia y la frecuencia a través del espectro integrado de la señal, el cual es una función de la frecuencia  $f$  y muestra la potencia acumulativa en el espectro en función de  $f$ . El resultado que se observa en 1.19 es una línea recta que indica que la potencia es constante en todas las frecuencias en promedio. Este tipo de ruido con la misma presencia en todo el rango de frecuencias también se denomina ruido blanco, en analogía con la luz, la cual es blanca cuando hay una mezcla igual de frecuencias en todo el rango visual.

```

1 def make_integrated_spectrum(self):
2     cs = np.cumsum(self.power)
3     cs /= cs[-1]

```



**Figura 1.19:** Espectro integrado del ruido UU.

```
4 return IntegratedSpectrum(cs, self.fs)
```

`self.power` es un array NumPy que contiene la potencia para cada una de las frecuencias. `np.cumsum` computa la suma acumulativa de las potencias. Así de esta manera obtenemos la definición de la clase siguiente:

```
1 class IntegratedSpectrum(object):
2     def __init__(self, cs, fs):
3         self.cs = cs
4         self.fs = fs
5
6 integ = spectrum.make_integrated_spectrum()
7 integ.plot_power()
```

Finalmente solo mencionar que existe una cantidad muy diversa de ruidos, algunos de los cuales vamos a ir desgranando en los siguientes apartados de este capítulo. Tan solo aquí mencionar el ruido browniano y el ruido rosado, tal y como los comparamos con el ruido blanco en la figura 1.20.

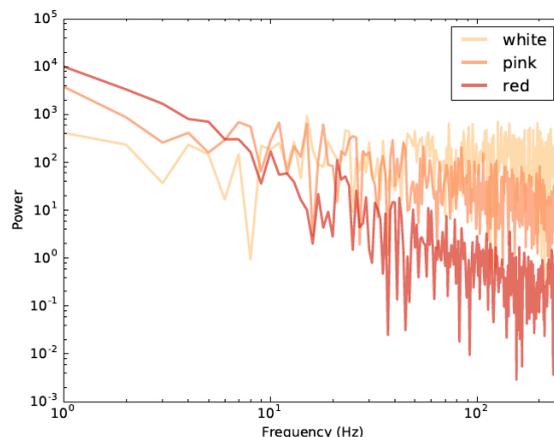


Figura 1.20: Ruido blanco, browniano y rosado en escala log-log.

## 1.6. Auto-semejanza Temporal y Ruido Fractal

En geometría dentro del estudio de las propiedades de curvas y superficies existe una subrama de ésta que, a través de la geometría diferencial, investiga estructuras topológicas diferenciables, i.e. que tan suaves y analíticamente tratables son ciertas estructuras aunque sus formas sean muy complicadas. Opuestamente a esta suavidad diferenciable existen los objetos fractales, pionerizados y difundidos principalmente por los trabajos de Benoit B. Mandelbrot [71].

Existe una gran diversidad de fenómenos físicos, químicos y biológicos en los que se han encontrado este tipo de construcciones, estructuras y propiedades, como por ejemplo en las líneas costeras geográficas, los sistemas de agregación por difusión limitada (DLA) o en los helechos (ver figura 1.21). Mandelbrot define formalmente: “un fractal es por definición un set en el cual la dimensión de Hausdorff-Besicovich <sup>xxiv</sup>.

estrictamente excede la dimensión topológica”. Desde un punto de vista menos formal matemáticamente, un fractal es un objeto construido de cierta manera a partir de partes similares al todo. Esta última definición remarca una propiedad inherente a este tipo de

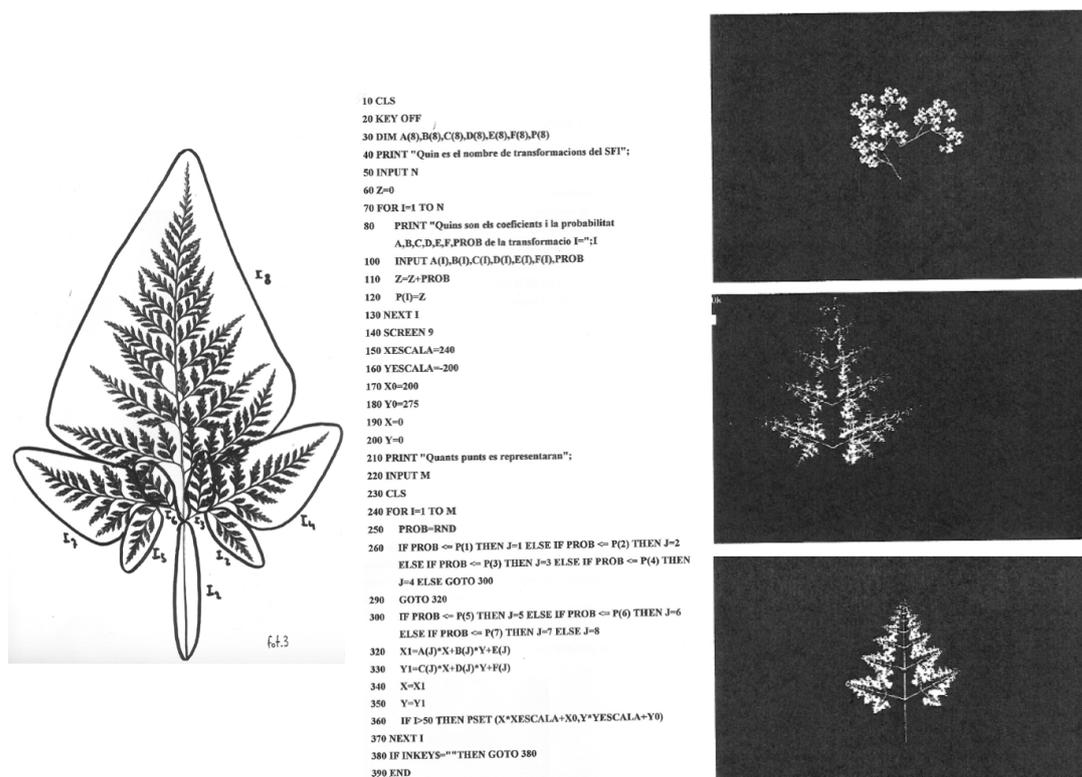
<sup>xxiv</sup>Formalmente se puede definir así: Sea  $X$  un espacio métrico. Si  $S \subset X$  y  $d \in [0, \infty)$ , entonces el contenido  $d$ -dimensional de Hausdorff de  $S$  se define como:

$$C_H^d(S) := \inf\{\sum_i r_i^d : \text{una cobertura de } S \text{ con bolas de radio } r_i > 0\},$$

entonces la dimensión de  $X$  se define como:

$$\dim_H(X) := \inf\{d \geq 0 : C_H^d(X) = 0\}$$

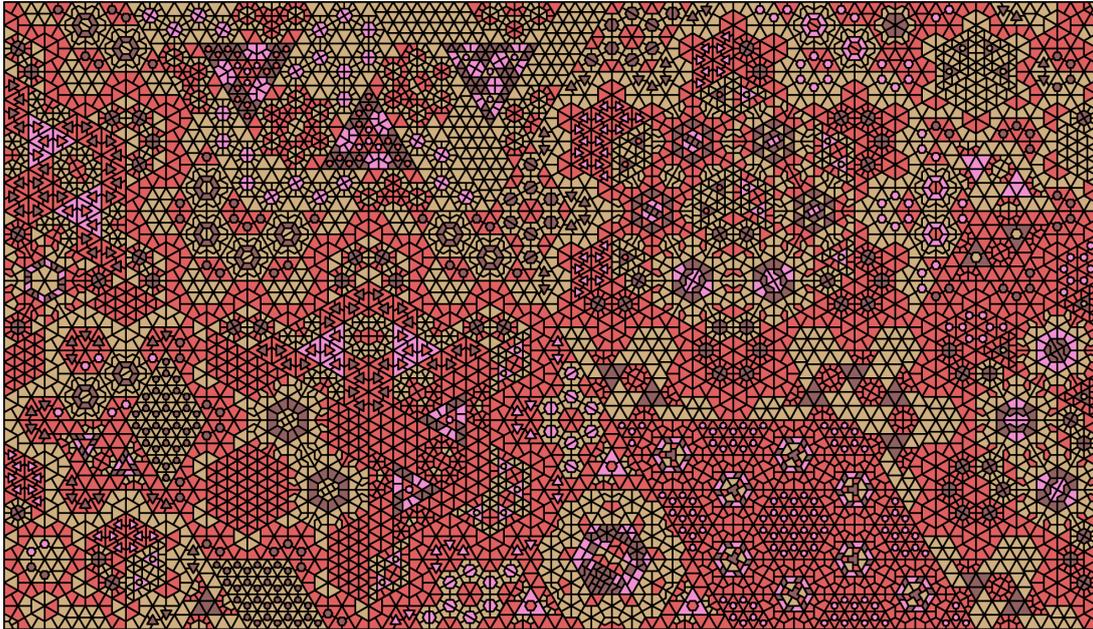
estructuras: la invariancia de escala o auto semejanza.



**Figura 1.21:** Helecho fractal. Intento personal del año 2002 de crear un helecho fractal (derecha) mediante un sistema de funciones iteradas (IFS) en código BASIC (centro) que reprodujera el helecho *Asplendium Adiantum Nigrum* (izquierda).

Los fractales se generan a través de cálculos relativamente sencillos, repetidos una y otra vez, utilizando recursivamente en cada paso los resultados del paso anterior. En algunos casos se generan a través de funciones iteradas (ver figura 1.22), las cuales pueden ser por ejemplo transformaciones afines en el plano o en el espacio. Los comportamientos generados a través de las funciones iteradas pueden ser: (i) estables, (ii) periódicos o (iii) caóticos. En este último caso particular, existe una propiedad de sensibilidad a las condiciones iniciales y toda una área de estudio cuantitativo sobre el comportamiento inestable y aperiódico de estos sistemas no-lineales deterministas.

De la misma manera que desde el dominio espacial se pueden construir geometrías fractales, también desde el dominio temporal se pueden construir series de tiempo fractales, donde fragmentos de dichas series de tiempo tienen propiedades de auto-similaridad o



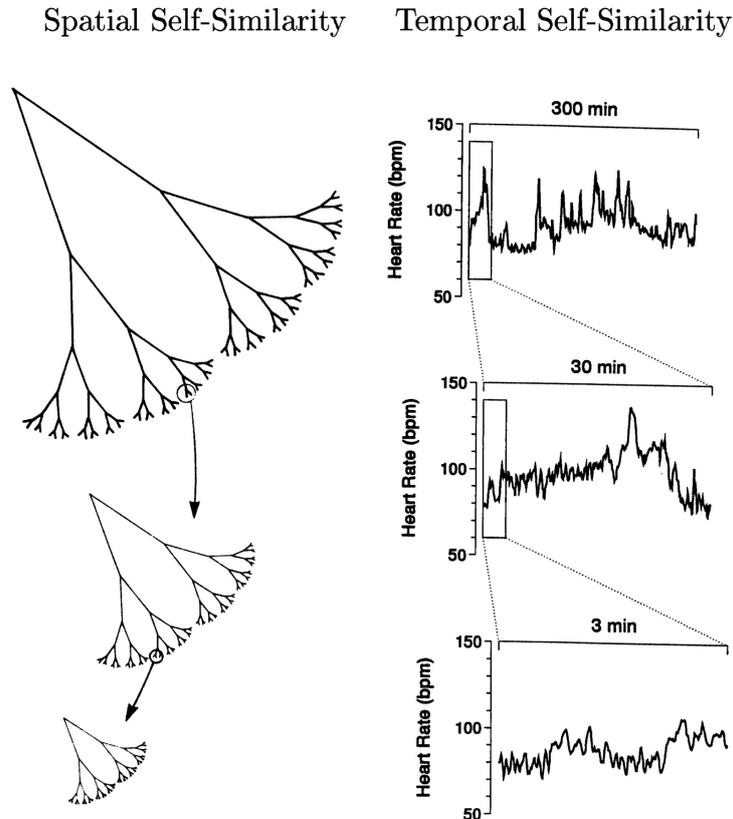
**Figura 1.22:** Figura auto-similar (similar al estilo decorativo mozárabe o a la visión en DMT) generada a través de un anidamiento de teselaciones geométricas de Kirshombille y el algoritmo Forsythia Fractal.

auto-semejanza respecto a la serie original. Uno de los ejemplos más estudiados de series de tiempo fractal son las conformadas en los latidos del corazón (ver figura 1.23), los cuales se ha observado en humanos que son auto-similares en escalas temporales que abarcan desde los 10 segundos a varias horas [72].

En el caso que una serie de tiempo sea fractal entonces tenemos que su potencia espectral  $S_{xx}(f)$  tiene que ser un invariante de escala que se comporte como una ley de potencias de la siguiente manera:

$$S_{xx}(f) \sim f^\beta, \tag{1.8}$$

donde  $\beta$  es el exponente de densidad espectral, con  $\beta = 0$  para el ruido blanco,  $\beta = 1$  para el ruido rosado o ruido  $1/f$  o flicker noise, y  $\beta = 2$  para el ruido rojo o ruido browniano. En general para exponentes  $-2 < \beta < 0$  se denomina el ruido como ruido enrojecido. Por lo tanto en una representación log-log, la ley de potencias se traduce en una línea recta con pendiente  $\beta$ .



**Figura 1.23:** Figura auto-similar espacial de un árbol tipo Lindenmeyer System y temporal de los latidos del corazón a distintas escalas temporales [72].

A parte de  $S_{xx}(f)$  también podemos ver que la función de auto-correlación de la serie tiene que ser invariante de escala. Para entender la función de auto-correlación partimos de la ecuación de la PSD  $S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \mathbf{E} [|\hat{x}(\omega)|^2]$  que habíamos encontrado en el apartado anterior y mostramos explícitamente que esta se puede escribir como:

$$\mathbf{E} [|\hat{x}(\omega)|^2] = \mathbf{E} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x^*(t) e^{i\omega t} dt \int_0^T x(t') e^{-i\omega t'} dt' \right] = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^T \mathbf{E} [x^*(t)x(t')] e^{i\omega(t-t')} dt dt'. \quad (1.9)$$

A partir de aquí, para un proceso aleatorio estacionario, se puede utilizar un cambio de variable  $\Delta t = t - t'$  y de límites de integración y en vez de integrar de  $[0, T]$  integramos aproximándonos a infinito. De esta manera la PSD  $S_{xx}(\omega)$  y la función de

auto-correlación<sup>xxv</sup> de la señal se muestran una como la transformada de la otra (está transformación forma parte del teorema de Wiener–Khinchin). Finalmente la función de auto-correlación se define como:

$$R_{xx}(\tau) = \langle X(t)X(t + \tau) \rangle = \mathbf{E}[X(t)X(t + \tau)]. \quad (1.10)$$

En el caso que  $R_{xx}(\tau)$  sea completamente integrable (y no siempre es así) tenemos que la función de auto-correlación es la inversa de la transformada de Fourier de la potencia espectral:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau = \hat{R}_{xx}(\omega). \quad (1.11)$$

Siguiendo en la línea argumentativa anterior tenemos que, si la potencia espectral obedece una ley de escala del tipo  $f^\beta$  entonces podemos aplicar una transformación de escala en el dominio temporal tal que  $\tau \mapsto \tau' = \lambda \cdot \tau$  con un factor de escala  $\lambda \in \mathbb{R}$ , obtenemos que (definiendo el operador  $F^{-1}$  como transformada inversa de Fourier):

$$R_{xx}(\lambda\tau) = F^{-1} \left( \frac{1}{\lambda} S \left( \frac{f}{\lambda} \right) \right) = \lambda^{-\beta-1} F^{-1} (f^\beta) = \lambda^{-\beta-1} R_{xx}(\tau), \quad (1.12)$$

de esta manera la función de auto-correlación conserva su comportamiento después de las transformaciones de escala temporales con un factor de escalamiento definido por  $\lambda^{-\beta-1}$  y podemos decir que la función de auto-correlación obedece en si misma otra ley de potencias.

Para el caso particular del ruido blanco con  $\beta = 0$  tenemos que:

$$R_{xx}(\lambda\tau) = \frac{1}{\lambda} R_{xx}(\tau), \quad (1.13)$$

a partir de aquí y viendo la siguiente propiedad de la función Delta de Dirac en la que  $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\alpha x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(u) \frac{du}{|\alpha|} = \frac{1}{|\alpha|}$  y que por lo tanto  $\delta(\alpha x) = \frac{\delta(x)}{|\alpha|}$ , tenemos que la función

---

<sup>xxv</sup>La función de auto-correlación se puede interpretar como una medida que indica que tan rápido una serie temporal pierde semejanza con ella misma cuando esta la desplazamos en el tiempo.

de auto-correlación es una Delta de Dirac:

$$R_{xx}(\tau) = \delta(\tau) \quad (1.14)$$

El ruido  $1/f$  es otro caso particular con  $\beta = -1$  en el que se cumple que:

$$R_{xx}(\lambda\tau) = R_{xx}(\tau), \quad (1.15)$$

y tiene como posibles soluciones  $R_{xx}(\tau) = cte$  o bien  $R_{xx}(\tau) = -\log\tau$ , así aplicando logaritmo y viendo que  $\log(\lambda\tau) = \log\lambda + \log\tau$  obtenemos que  $R_{xx}(\lambda\tau) \simeq R_{xx}(\tau)$  ya que  $\log\tau$  es una constante que no contribuye en la evolución temporal [73].

Finalmente para el caso del ruido browniano con  $\beta = -2$  vemos que la función de auto-correlación se puede escribir como:

$$R_{xx}(\lambda\tau) = \lambda R_{xx}(\tau), \quad (1.16)$$

la cual es una función homogénea de grado 1, e inversamente al ruido blanco es muy grande y tiende a infinito<sup>xxvi</sup>.

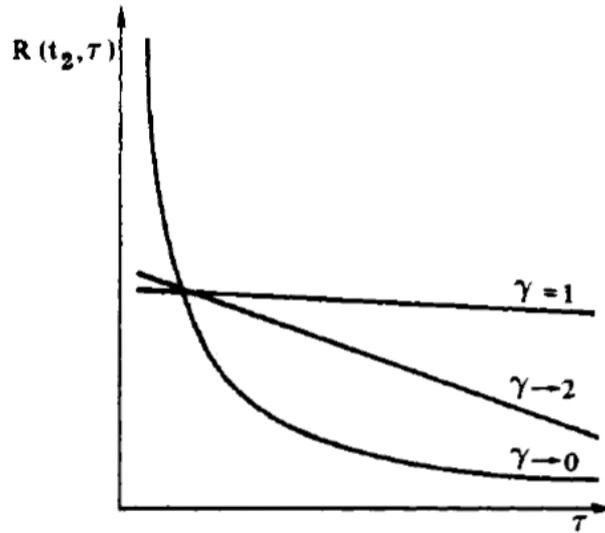
## 1.7. Correlaciones y Transiciones de Fase

Siguiendo con el apartado anterior y una vez definida la función de auto-correlación  $R_{xx}$ , observamos que el exponente  $\beta$  perteneciente a la PSD se puede interpretar como una medida de la cantidad de correlaciones pertenecientes en una serie temporal. En concreto vemos que las correlaciones son cero para el ruido blanco cuando el exponente  $\beta = 0$ , son grandes para el ruido browniano con  $\beta = -2$  y son infinitas para series periódicas con  $\beta = -\infty$  (ver figura 1.32).

---

<sup>xxvi</sup>Dependiendo de la literatura que se revise [74], en unos casos se indica que la función de auto-correlación para el ruido browniano sigue  $R(t, \tau) = Q \left( t - \frac{|\tau|}{2} \right)$  donde  $Q$  es un constante de proporcionalidad, o bien definido a través del ruido fraccional browniano discretizado con exponente de Hurst  $H = 1/2$  la expresión es  $R = 1 - \frac{n(n-1)\tau^{2H}}{2 \sum_{i=1}^{n-1} [(n-i)i^{2H}]}$  donde  $n$  es el número de pasos de la serie.

De esta manera el parámetro de control  $\beta$  se puede considerar como una medida de la complejidad. En señales donde las correlaciones de largo alcance y con un decaimiento de  $R_{xx}$  lento se sugiere que el sistema posee una memoria a largo plazo, y a varias escalas temporales respecto a los estados previos, que afecta su comportamiento actual.



**Figura 1.24:** Función de auto-correlación en función de la lag temporal generado a través de varios sistemas electrónicos resistor-capacitor (RC) [75].

Según la literatura el ruido rosado  $\beta = -1$  conforma un caso especial ya que es el que posee un decaimiento más lento de la función de auto-correlación, adjudicando a esta señal una característica de transición de fase perteneciente a diferentes sistemas físicos con una memoria máxima [75][73](ver figura 1.32). El ruido  $1/f$  se manifiesta ubicuamente en una gran diversidad de fenómenos naturales de transporte, tales como en sistemas de resistores electrónicos, en los relojes de arena, en los crecimientos y bajadas del flujo del río Nilo, en la luminosidad de ciertos sistemas estelares [76] o bien en el dominio musical, tal y como veremos en el apartado siguiente [77].

En nuestro caso, para investigar esta propiedad compleja relacionada con la función de auto-correlación, hemos generado diferentes ruidos y calculado  $R_{xx}$  para comparar nuestros resultados con los de [73]. En este último artículo parten del estudio de [78], donde una de las maneras de construir series de tiempo con diferentes exponentes espectrales  $\beta$

dentro de cierto rango ( $0 \geq \beta \geq -3$ ) es a partir del filtrado de FFT de un ruido blanco. Más precisamente, uno empieza con un ruido blanco definido como  $F_0(t)$  y calcula la transformada de Fourier para obtener la amplitud espectral. Esta amplitud se multiplica por un factor  $\omega^{\beta/2}$  (el filtro). La potencia espectral se obtiene elevando al cuadrado la amplitud del espectro. Las series de tiempo correspondientes  $F_\beta(t_0)$  se obtienen a través de la inversa de la transformada de Fourier de la amplitud espectral:

$$F_\beta(t_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega e^{i\omega t_0} \omega^{\beta/2} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} dt F_0(t) e^{-i\omega t} \right). \quad (1.17)$$

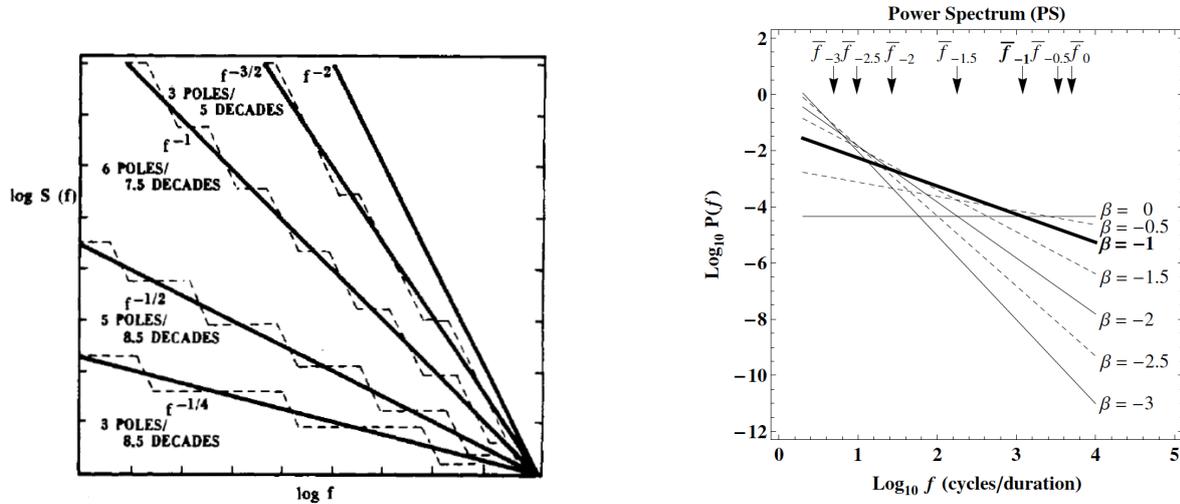
Calculando a través de este algoritmo la función de correlación se observa en [78] que esta aumenta desde el ruido blanco hacia ruidos enrojecidos y ésto se traslada en PSDs con pendientes más inclinadas en una escala logarítmica doble de  $S_{xx}(f)$  y  $f$  (ver figura 1.25a). El ruido más correlacionado corresponde a una serie periódica y se manifestaría como una pendiente vertical en 1.25b y los ruidos menos correlacionados se ve como evolucionan mas rápido en el tiempo y tienen más cruces con el cero que los ruido correlacionados como vemos en 1.25b.

Una cuestión clave para obtener la figura 1.25b es utilizar para el cálculo de la función de auto-correlación la frecuencia media ponderada definida como:

$$\bar{f}_\beta = \frac{\sum_f f P(f)}{\sum_f P(f)}. \quad (1.18)$$

Ésta es proporcional al número de cruces con el cero para cada una de las series temporales y constituye una medida de la velocidad relativa a través de la cual evoluciona la serie temporal. De esta manera para poder comparar series temporales con diferentes exponentes  $\beta$  se deben tomar fragmentos de las series temporales que sean igualmente densas [73]. Esto se puede implementar tomando de la serie el mismo número de periodos medios ponderados, definidos como  $\bar{t}_\beta = 1/\bar{f}_\beta$ .

Siguiendo en nuestra exploración de la complejidad en el ámbito sonoro y para corroborar la propiedad en la que la auto-correlación del ruido  $1/f$  sigue un decaimiento



(a) Ajuste de la PSD en varios sistemas lineales RC para para obtener el ruido  $1/f$  y con diferentes exponentes  $\beta$ . Las líneas punteadas corresponden a las asíntotas de la función [75].

(b) PSDs con varios exponentes  $\beta$  obtenidos con la función de filtrado de FFT. Se muestra también las frecuencias medias ponderadas utilizadas en [73] para llegar a este resultado.

**Figura 1.25:** Auto-correlaciones de ruidos con diferentes exponentes  $\beta$ .

más lento que en las otras series temporales, implementamos un sistema de generación de ruidos a través de otros algoritmos diferentes a [75],[73]. A continuación detallamos el procedimiento y referenciamos, por la extensión, la parte de código en Python al anexo A.

Para empezar la comparativa en este caso generamos ruido browniano, ruido rosa, ruido fraccional browniano (FBM) y ruido multi-fraccional browniano (mFBM). Primero para generar el ruido browniano y rosado seguimos el algoritmo de Timmer & Koenig [79], el cual utiliza la teoría de estimación espectral de Priestley[80] en el que se define una variable aleatoria compleja gaussiana como:

$$f(\omega) = N\left(0, \frac{1}{2}S(\omega)\right) + iN\left(0, \frac{1}{2}S(\omega)\right), \quad (1.19)$$

la varianza de la cual no depende del número de puntos representativos de los datos.

Para generar el ruido fraccional browniano seguimos el método de Davies Harte [81],

y para el ruido multi-fraccional browniano el método de representación de Riemann-Liouville [82].

De la misma manera que podemos generar las PSD de los ruidos a través de diferentes valores del exponente  $\beta$ , el método para el FBM, introducido por Mandelbrot y Van Ness [83], utiliza la propiedad de que en estos procesos la varianza de la serie es una función del tiempo en que ésta está computada tal que:

$$\text{Var}(B_t^H) \propto t^{2H}, \tag{1.20}$$

donde  $H$  es el exponente de Hurst, el cual puede tomar cualquier valor real en el intervalo  $[0, 1]$ . Éste se relaciona con el exponente  $\beta$  anterior a través de la dimensión fractal de esta manera:

$$D = 2 - H = \frac{5 - \beta}{2}. \tag{1.21}$$

En nuestro caso vamos a comparar el ruido browniano generado a través del algoritmo de Timmer & Koenig con el browniano del FBM escogiendo el índice de Hurst  $H = 1/2$  el cual recupera el exponente  $\beta = -2$ .

En el caso del ruido mFBM, éste se genera con un índice de Hurst el cual varía con el tiempo  $H = H(t)$ . En nuestro caso escogemos que:

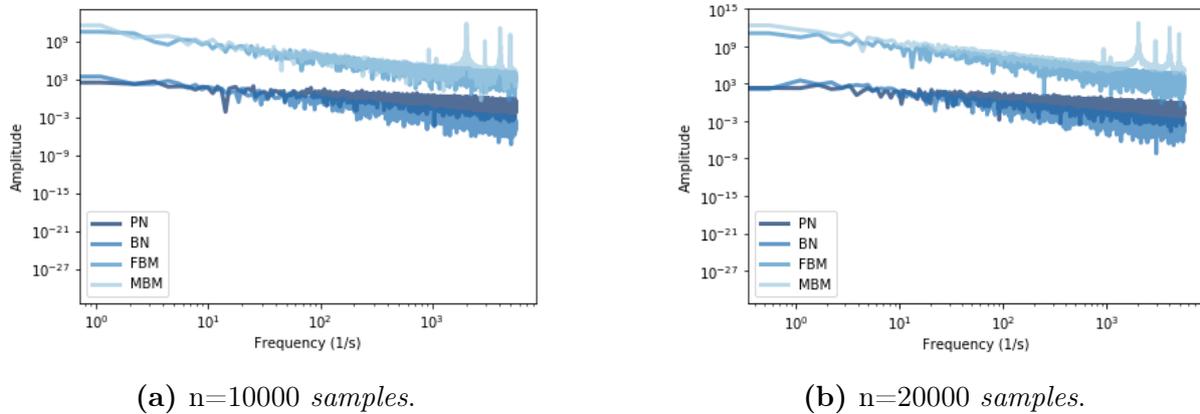
```

1 #MULTI FRACTIONAL BROWNIAN MOTION
2 ### Example Hurst function with respect to time.
3 def h(t):
4     return 0.25 * math.sin(20*t) + 0.5

```

, el cual sigue una función de onda con una amplitud  $A = 0,25$ , oscila con una frecuencia  $\omega = 20$  y tiene una fase  $\phi = 0,5$ .

A continuación mostramos las figuras obtenidas después de correr el código, primero para un número de *samples* (o realizaciones en el tiempo) de  $n = 10000$  y después para



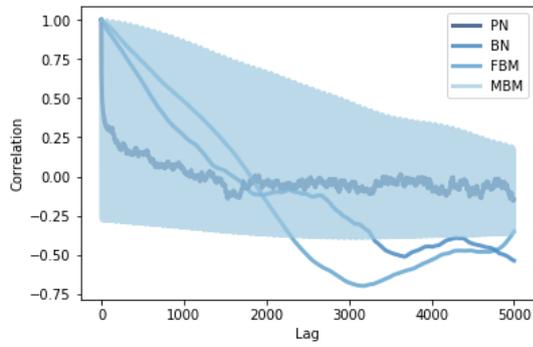
**Figura 1.26:** Espectrograma generado del ruido browniano, rosado, FBM y mFBM.

$n = 20000$ <sup>xxvii</sup>. Primero de todo obtenemos los espectrogramas de cada uno de los ruidos.

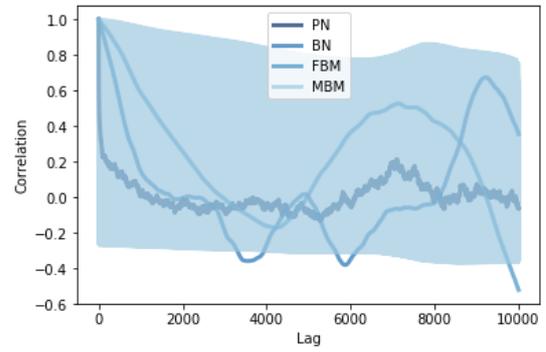
En la siguiente figura graficamos la función de auto-correlación obtenida para cada uno de los ruidos. En ésta podemos observar que en la figura 1.27a el ruido rosado es el que decae más lentamente mientras que en la figura 1.27b el ruido rosado decae más rápido que el ruido browniano, el cual muestra un pico de crecimiento aproximadamente a partir del  $lag = 8000$  (que corresponde al tiempo de *sampleado* de  $n = 16000$ ). Igualmente mientras vemos que en la figura 1.26b el ruido browniano y el FBM (con  $H = 0,5$  recordemos) se comportan de manera aproximadamente igual, en la figura 1.27b éstos muestran comportamientos diferentes sobretodo a partir del  $lag = 4000$ , lo cual demuestra que el comportamiento de la función de auto-correlación depende sensiblemente del algoritmo utilizado para generar la señal.

Ahora volvemos a calcular la función de auto-correlación pero a través de las medias ponderadas de los periodos tal como describíamos en la ecuación 1.18. En las siguientes gráficos observamos que la función de auto-correlación con tiempos propios sigue la misma forma que en 1.27a y 1.27b para el ruido browniano y el ruido rosado solo que escalados en el tiempo, mientras que para el FBM y el mFBM éstos tienden a cero instantáneamente.

<sup>xxvii</sup>El tiempo de cómputo requerido para  $n = 1000$  es aproximadamente de 15 minutos y de aproximadamente 1 hora para  $n = 20000$  en mi procesador de 2.7 GHz Intel Core i5 y de 8Gb de RAM. Por ello estamos implementando actualmente, junto a Stalin Muñoz del C3, el funcionamiento del *script* en el *cluster* borRomeo del C3 el cual utiliza un ambiente Hadoop para procesamiento de datos masivos. <https://lncc.c3.unam.mx>

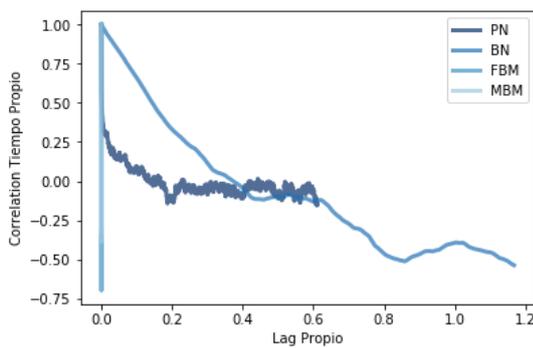


(a)  $n=10000$  samples.

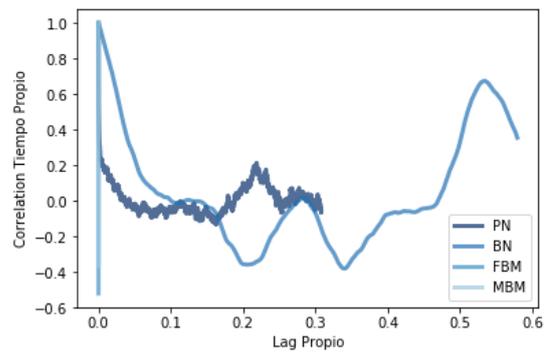


(b)  $n=20000$  samples.

**Figura 1.27:** Función de auto-correlación obtenida para del ruido browniano, rosado, FBM y mFBM.



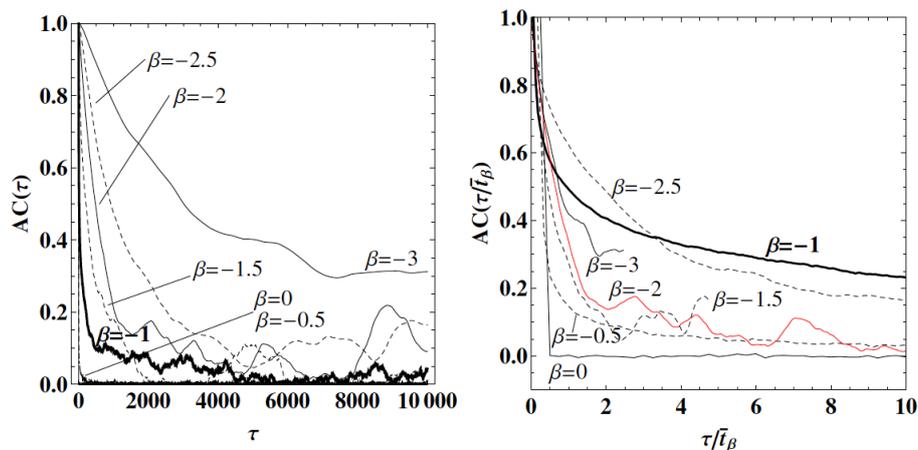
(a)  $n=10000$  samples.



(b)  $n=20000$  samples.

**Figura 1.28:** Función de auto-correlación con tiempos de lag propios obtenidos para del ruido browniano, rosado, FBM y mFBM.

A partir de aquí resaltamos la discrepancia entre las figuras ?? obtenidas a partir de la generación de nuestros ruidos con las figuras 1.30 obtenidas en [73]. Podemos adjudicar primeramente estas diferencias a través de los distintos algoritmos utilizados para la generación de los mismos ruidos o bien a errores en la generación de las funciones de auto-correlación con los tiempos propios de las series (ver anexo con el código A).



**Figura 1.29:** Función de auto-correlación en tiempo absoluto y tiempo propio para distintas series con exponentes que varían de  $\beta = 0$  a  $\beta = -3$ . Aquí si se observa que  $\beta = -1$  decae más lentamente que cualquier otra serie.

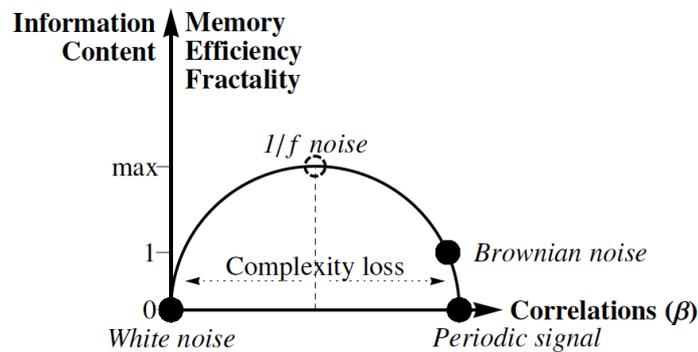
Para ir cerrando esta sección, resumimos que desde una aproximación intuitiva la complejidad está inversamente relacionada con el entendimiento de un sistema y eso significa que como más sencilla sea la descripción de un fenómeno éste será menos complejo. En el caso de las señales aleatorias no correlacionadas, como en el ruido blanco, éstas resultan muy difíciles de predecir, incluso cuando se conoce completamente la historia pasada de dicho sistema, no obstante estas señales se pueden describir de una manera muy sencilla y por ende no se pueden considerar realmente complejas. Por otro lado, las señales altamente correlacionadas también son muy predecibles, como en el caso de las señales periódicas o el ruido browniano, ya que también se pueden describir a través de un algoritmo de manera sencilla.

En el caso específico del ruido  $1/f$ , un sistema que presenta una influencia en el presente de elementos de su historia pasada tiene que disponer de algún mecanismo de alma-

cenamiento de información. De esta manera nos podemos preguntar cual es el contenido informacional de los ruidos con diferentes  $\beta$ . Según Keshner[75]:

“The results may be somewhat surprising. Approximately 1 section (also 1 state variable) is required per decade of frequency to fit a  $1/f$  power spectral density. Slightly fewer are required for  $\beta = -0,5$  and  $\beta = -3/2$ , with the value decreasing towards zero per decade as  $S(f)$  approaches white noise or Brownian motion. (Note: Brownian motion requires a total of one state variable.)”

Así Fossion et.al.[73] comentan al respecto que la presencia de ruido  $1/f$  se puede entender como una huella que se imprime en un sistema cuando éste maximiza su eficiencia dentro de sus propios límites. Esta afirmación se enmarca entonces dentro de la asunción que los sistemas naturales operan para maximizar su eficiencia y a la vez que empíricamente en muchos de estos sistemas se observan señales  $1/f$ .



**Figura 1.30:** Diagrama de fase esquemático para distintos ruidos. El exponente  $\beta$  opera como una especie de parámetro de control y una medida informacional relacionada con la complejidad como parámetro de orden. El ruido  $1/f$  se puede ver como un punto crítico del sistema el cual maximiza la memoria, la eficiencia, la fractalidad y el contenido informacional.[73]

Para esclarecer un poco que parámetros de orden relacionados con la complejidad se pueden utilizar para delimitar los conceptos de emergencia y auto-organización dentro de las series temporales y en los fenómenos sonoros, en la próxima sección desarrollaremos el concepto de entropía a partir de una teoría que se fundamenta en la termodinámica y en la mecánica estadística del sonido.

## 1.8. Termodinámica del Sonido y Entropía Vibracional

En el capítulo anterior hemos observado a partir del análisis de diferentes ruidos y series temporales algunas propiedades relacionadas con la emergencia de ciertos patrones dentro del dominio temporal. Partiendo de las señales  $x(t)$  que generan estos ruidos o series hemos visto como podemos clasificar su complejidad a través algunas funciones que por ejemplo cuantifican cuanta “memoria” posee un sistema. Sin embargo no hemos entrado específicamente a entender cual es el mecanismo que genera la señal  $x(t)$  propiamente dicha.

Por ello en este capítulo utilizaremos conceptos y técnicas que provienen de la termodinámica del sonido (en la primera parte) y de la termodinámica vibracional (en la segunda parte) para intentar dilucidar, a través de modelos basados en osciladores, algunas características básicas de dichos sistemas.

Desde la física podemos ver que la energía del sonido proviene de una onda mecánica, de la cual generalmente se puede decir que consiste en una compresión elástica oscilatoria y un desplazamiento oscilatorio en un fluido. En este caso el medio actúa como almacén de energía potencial y cinética, y como consecuencia la energía del sonido en un volumen se puede definir como la suma de las densidades de energía potencial y cinética integradas sobre todo el volumen:

$$W = W_{\text{potential}} + W_{\text{kinetic}} = \int_V \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} dV + \int_V \frac{\rho v^2}{2} dV. \quad (1.22)$$

No obstante sin la entropía para complementar a la energía, la termodinámica sería como una sola mano aplaudiendo. En la tumba de Boltzmann se muestra esta ecuación:

$$S = k_B \ln \Omega, \quad (1.23)$$

la cual, como ya hemos apuntado anteriormente, nos refiere a la cantidad de orden o desorden en un sistema. Sin embargo en esta ecuación el problema fundamental que

surge es encontrar la variable  $\Omega$ , la cual toma en consideración las maneras de encontrar las coordenadas microscópicas internas en un sistema para llegar a un estado de estados macroscópicos termodinámicamente equivalentes. Entonces aquí el *quid* de la cuestión es: ¿qué es lo que contamos? y ¿de qué manera lo contamos?. *Grosso modo* lo que vamos a contar a partir de ahora es el sonido, el cómo lo vamos a contar difiere en la metodología y el contexto específico, y por ello vamos a empezar ejemplificando el cálculo de la entropía a partir de uno de los resultados primigenios de la teoría termodinámica del sonido.

Lyon et.al.[84] publicaron en 1962 una ley fundamental, la cual relaciona el flujo de energía en un conjunto de osciladores mecánicos acoplados. Esta ley normalmente se denomina como ley de “proporcionalidad de la potencia de acople” y enuncia que bajo ciertas condiciones<sup>xxviii</sup> la energía mecánica fluye de regiones calientes a regiones frías. Esta ley sugiere una analogía con el principio de Clausius en termodinámica clásica, en el que se establece que un sistema que intercambia calor con depósitos externos y experimenta un proceso cíclico, es uno que finalmente devuelve un sistema a su estado original,

$$\oint \frac{\delta Q}{T_{\text{surr}}} \leq 0, \quad (1.24)$$

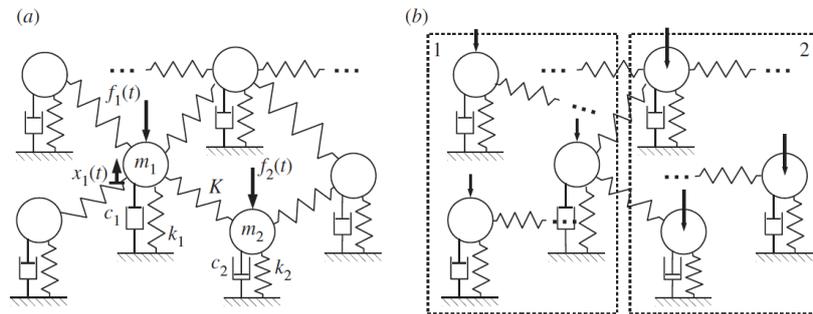
dónde  $\delta Q$  es la cantidad infinitesimal de calor absorbido por el sistema desde el depósito y  $T_{\text{surr}}$  es la temperatura del reservorio externo (entorno) en un instante particular en el tiempo.

Así como podemos observar a través de la figura 1.31, se puede demostrar (demostración completa en [85]) que la potencia vibracional media que fluye entre dos resonadores 1, 2 es proporcional a las energías vibracionales medias de cada uno de ellos:

$$\langle P_{12} \rangle = \beta (\langle E_1 \rangle - \langle E_2 \rangle) + o(\epsilon^2) \quad (1.25)$$

---

<sup>xxviii</sup>Que todos los acoples sean conservativos, débiles y las fuerzas sean ruidos blancos, para más detalles ver [85].



**Figura 1.31:** Resonadores mecánicos acoplados débilmente y acoplados y excitados por fuerzas externas aleatorias no correlacionadas [85].

donde,

$$\beta = \frac{K^2 (\Delta_1 + \Delta_2)}{m_1 m_2 \left[ (\Omega_1^2 - \Omega_2^2)^2 + (\Delta_1 + \Delta_2) (\Delta_1 \Omega_2^2 + \Delta_2 \Omega_1^2) \right]}, \quad (1.26)$$

y donde  $\Omega_i = \sqrt{(K + k_i)/m_i}$  son las frecuencias naturales de los osciladores y  $\Delta_i = c_i/m_i$  los anchos de banda de frecuencia. Este resultado se puede generalizar también a partir de otras restricciones [85] como en el caso de grupos de osciladores en interacción con  $N_i$  resonadores ( $N_i \gg 1$ ). En esta coyuntura vemos que:

$$\langle P_{12} \rangle = \beta \left( \frac{\langle E_1 \rangle}{N_1} - \frac{\langle E_2 \rangle}{N_2} \right) + o(\epsilon^2), \quad (1.27)$$

donde la potencia mecánica que va desde el subsistema 1 al subsistema 2 es proporcional a la diferencia de las energías modales  $\frac{\langle E_i \rangle}{N_i}$ , donde  $E_i$  es la energía media vibracional del sistema  $i$ . El factor  $\beta$  depende de las características de los osciladores de los dos subsistemas en interacción.

Por lo tanto, la analogía entre la ley de Lyon y el principio de Clausius remarca la importancia de las dos cantidades (extensivas)  $E$  y  $N$ . Éstas en la física estadística caracterizan el macro-estado de un sistema mientras que los micro-estados vienen caracterizados por la repartición de energía en cada uno de los modos de vibración. Para calcular estos micro-estados partimos del caso en que tenemos  $Z$  cuantos de energía y  $N$  lugares. A

partir de aquí podemos ver que el número de posibilidades de ordenar  $Z$  en  $N$  viene dado por:

$$W = \frac{(Z + N - 1)!}{Z!(N - 1)!}. \quad (1.28)$$

En esta estimación la energía es indistinguible mientras que los lugares  $N$  si son distinguibles [86].

Como ejemplo, dentro del contexto de la acústica, podemos ver que la densidad de modos acústicos viene dados por la siguiente fórmula  $n(\omega) = V\omega^2/2\pi^2c_0^3$ , donde  $c_0 = 340ms^{-1}$  es la velocidad del sonido. El número de modos con una frecuencia dentro del ancho de banda de una octava  $\Delta\omega = \omega/\sqrt{2}$  es  $N = n(\omega)\Delta\omega$ . Por ejemplo [85], en una habitación pequeña con un volumen  $V = 45m^3$  hay aproximadamente  $N \simeq 10000$  modos en el octavo de banda de  $1kHz$ .

Por otro lado, para determinar la energía y considerando que en la misma habitación hay un ruido de  $70dB$  tenemos que  $p = 2 \cdot 10^{-5} \times 10^{70/20} \approx 60mPa$ . Entonces obtenemos que la energía acústica contenida en esta habitación es  $E = p^2V/\rho_0c_0^2$ , donde  $\rho_0 = 1,3kgm^{-3}$  es la densidad del aire. Así obtenemos que  $E \approx 1\mu J$ . Entonces alrededor de  $1kHz$  el número de cuantos de energía es  $Z = E/\hbar\omega \approx 3 \cdot 10^{24}$ . Si comparamos finalmente  $N$  y  $Z$  entonces vemos que  $Z \gg N$ , y de esta manera podemos reescribir el número de configuraciones como:

$$W = \frac{Z^{N-1}}{(N - 1)!}. \quad (1.29)$$

Ahora a partir de la ecuación de Boltzmann y utilizando la aproximación de Stirling donde  $\log(N - 1)! = (N - 1) \log(N - 1) - (N - 1)$  podemos encontrar que:

$$\log(N - 1)! = (N - 1) \log(N - 1) - (N - 1). \quad (1.30)$$

Reescribiendo  $N$  en vez de  $N - 1$  y la  $Z = E/\hbar\omega$  encontramos la ecuación:

$$S(E, N) = k_B N \left[ 1 + \log \left( \frac{E}{\hbar\omega N} \right) \right], \quad (1.31)$$

la cual es la expresión final para la entropía de un sistema vibro-acústico con energía  $E$  distribuida en  $N$  modos alrededor de la frecuencia  $\omega$ . En ésta expresión aparecen dos constantes fundamentales, la constante de Planck  $\hbar$  y la constante de Boltzmann  $k_B$ .

Para interpretar esta última fórmula notamos que la energía vibracional en este caso no está localizada en los átomos en si, sino más bien en los modos normales de vibración y por ende asumimos que la configuración microscópica viene completamente determinada por la repartición de energía en cada uno de estos modos. Una de las principales restricciones de esta fórmula es su aplicabilidad limitada a sistemas desordenados y el hecho de que no tiene en cuenta la repartición exacta de energía cinética y elástica en la construcción de los modos de vibración.

Por este motivo de ahora en adelante vamos a desarrollar, desde una aproximación a partir de los sólidos harmónicos [87], otra manera para calcular la entropía tomando en cuenta que la energía vibracional está localizada en los átomos y en la repartición exacta de energía en cada uno de los modos. En este caso y desde un punto de vista cuántico estos modos corresponden a los modos en un fonón y éstos se pueden considerar aproximadamente como osciladores harmónicos independientes en un sólido.

Así partiendo de la función de partición para un oscilador harmónico con frecuencia  $\omega_i = \epsilon_i/\hbar$  tenemos que:

$$Z_i = \sum_n^{\infty} e^{-\beta(n+1/2)\epsilon_i}, \quad (1.32)$$

y si consideramos esta como una serie geométrica multiplicada por el factor constante  $\exp(-\beta\epsilon_i/2)$  con  $\beta \equiv (k_B T)^{-1}$  obtenemos que:

$$Z_i = \frac{e^{-\beta\epsilon_i/2}}{1 - e^{-\beta\epsilon_i}}. \quad (1.33)$$

Por lo tanto la función de partición de un sólido harmónico con  $N$  átomos y  $3N$  osciladores independientes (correspondientes a las 3 coordenadas espaciales) es el producto de las funciones de partición de los osciladores individuales,

$$Z_N = \prod_i^{3N} \frac{e^{-\beta\varepsilon_i/2}}{1 - e^{-\beta\varepsilon_i}}, \quad (1.34)$$

a partir de la cual podemos calcular la energía libre del fonón a través de  $F = -k_B T \ln Z$  de la siguiente fórmula:

$$F_{\text{vib}} = \frac{1}{2} \sum_i^{3N} \varepsilon_i + k_B T \sum_i^{3N} \ln(1 - e^{-\beta\varepsilon_i}), \quad (1.35)$$

y la entropía del fonón (entropía vibracional) a través de la diferenciación con respecto de  $T$ :

$$S_{\text{vib}} = k_B \sum_i^{3N} \left[ -\ln(1 - e^{-\beta\varepsilon_i}) + \frac{\beta\varepsilon_i}{e^{\beta\varepsilon_i} - 1} \right]. \quad (1.36)$$

Ahora utilizando la distribución de Planck para la ocupación de los fonones en función de la temperatura vemos que:

$$\begin{aligned} n(\varepsilon_i, T) &= \frac{1}{e^{\beta\varepsilon_i} - 1} \\ -\ln(e^{-\beta\varepsilon_i} - 1) &= \ln(1 + n) \\ \beta\varepsilon_i &= \ln\left(\frac{1+n}{n}\right) \end{aligned} \quad (1.37)$$

y a partir de aquí es fácil mostrar que esta ecuación se puede expresar como la entropía para cada oscilador como:

$$S_{\text{osc}} = +k_B [(1+n) \ln(1+n) - n \ln n] \quad (1.38)$$

de igual manera esta última ecuación se puede obtener a partir de la definición de la entropía de Boltzmann a través de la relación combinatoria  $\Omega = (M+m)!/[M!m!]$  para

$m$  fonones en  $M$  osciladores, con  $n = m/M$ .

Normalmente para realizar cálculos se utiliza la densidad de estados de fonones,  $g(\epsilon)$ . Así en el caso de un sólido en 3 dimensiones existen  $3Ng(\epsilon)$  modos fonónicos en el intervalo  $d\epsilon$ . A partir de ahí se puede calcular numéricamente la función de partición en un intervalo  $\Delta\epsilon$  como

$$Z_N = \prod_{j=1}^m \left( \frac{e^{-\beta\epsilon_j/2}}{1 - e^{-\beta\epsilon_j}} \right)^{3Ng(\epsilon_j)\Delta\epsilon}, \quad (1.39)$$

y como ya hemos hecho anteriormente, a partir de la distribución de Planck obtenemos una expresión para el cálculo de la entropía fonónica en un material armónico a cualquier temperatura

$$S_{\text{vib}}(T) = 3k_B \int_0^\infty g(\epsilon) [(n(\epsilon) + 1) \ln(n(\epsilon) + 1) - n(\epsilon) \ln(n(\epsilon))] d\epsilon, \quad (1.40)$$

donde  $g(\epsilon)$  está normalizada a 1 y  $n(\epsilon)$  es la distribución de Planck a cualquier temperatura específica.

En el caso de altas temperaturas podemos simplificar la ecuación 1.39 como

$$Z_N = \prod_{j=1}^m \left( \frac{k_B T}{\epsilon_j} \right)^{3Ng(\epsilon_j)\Delta\epsilon}, \quad (1.41)$$

y entonces la ecuación 1.40 se simplifica para un modo de oscilación con energía  $\epsilon = \hbar\omega$  como:

$$S_{\text{vib},\omega}(T) = k_B [(n(\epsilon) + 1) \ln(n(\epsilon) + 1) - n(\epsilon) \ln(n(\epsilon))] \simeq k_B \left[ \ln \left( \frac{k_B T}{\hbar\omega} \right) + 1 \right]. \quad (1.42)$$

Notamos al fin que esta ecuación recupera el resultado encontrado inicialmente con  $N = 1$  de la ecuación para la entropía 1.31 obtenida mediante la suposición proveniente de la ley de Lyon.

Finalmente para resumir las dos aproximaciones metodológicas que nos han llevada a

encontrar una expresión de la entropía sonora desde dos aproximaciones físicas diferentes, vamos a comparar numéricamente las ecuaciones 1.31 con 1.38.

La primera se encuentra suponiendo, como explicábamos con anterioridad, considerando un volumen de modos de vibración de unos  $45m^3$

$$S = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K \cdot 10^4 \cdot \left( 1 - \log \left( 3 \cdot \frac{10^{24}}{10^4} \right) \right) = 2,68784273 \times 10^{-18} J/K. \quad (1.43)$$

En el último caso tomamos el sistema mínimo capaz de generar un sonido, i.e. un fonón  $m = 1$  y un oscilador  $M = 1$

$$S = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K (2 \ln 2 - \ln 1) = 1,91308622 \times 10^{-23} J/K. \quad (1.44)$$

Comparando ambas expresiones vemos efectivamente que la entropía 1.43 es mayor en 5 ordenes de magnitud que la entropía en 1.44. Ésto nos proporciona finalmente una medida cuantitativa de que tan desordenado es un sistema sonoro macroscópico en un volumen del espacio respecto al sistema fonónico mínimo capaz de generar un sonido en un sólido.

## 1.9. Estadísticas y Leyes de Escala en el Dominio Musical

En esta sección nos centraremos en elaborar un entendimiento de los conceptos de emergencia y auto-organización, detallados en las secciones anteriores, desde un punto de vista musical y ya no meramente desde el punto de vista de las series temporales o de los fenómenos sonoros o acústicos. Para ello primero revisaremos algunas medidas de orden, predicción y sorpresa, al igual ciertas leyes de escala que surgen en varios casos dentro del dominio musical.

Para iniciar este análisis remarcamos a nivel cualitativo la semejanza y los múltiples parecidos que existen entre el lenguaje y la música. Así observamos como ambos representan maneras de comunicar y de utilizar patrones temporales para transmitir significado y coherencia [88]. Las palabras son los bloques a través de los cuales se construye un lenguaje, i.e. una secuencia de palabras, ordenadas en el tiempo, las cuales forman frases y otros componentes [89]. Los lenguajes se construyen además a partir de las repeticiones de estos bloques.

De la misma manera en la música, notas individuales o grupos de éstas o bien de silencios se repiten en un orden específico creando patrones sonoros. Según Levitin y Menon [90], una estructura musical aparece cuando elementos musicales se agrupan a través de una coherencia temporal, de tal manera que dicha estructura genera paralelamente una redundancia en la información y en la expectativa [90].

Podemos de esta manera conceptualizar cierta composición musical como una selección de ciertos sonidos los cuales forman un patrón en el tiempo [91]. Desde este punto de vista se pueden aplicar entonces medidas formales pertenecientes a la teoría de la información. Esta información se puede entender a partir de una cita de Warren Weaver:

« Information is ... a measure of one's freedom of choice in selecting a message. The greater this freedom of choice, and hence the greater the information, the greater is the uncertainty that the message actually is some particular one. Thus greater freedom of choice, greater uncertainty, greater information go hand in hand.» [92]

Aunque la visión en la que un compositor meramente ordena sonidos puede resultar algo reduccionista, el valor artístico de una composición radica quizás en la selección de dichos sonidos. Tal como dice Stravinsky, esa selección surge como:

« the need we feel to bring order out of chaos. ... To proceed by elimination — to know how to discard, as the gambler says, that is the great technique of selection. »

Sin embargo, para medir un orden estructural de cierta composición musical a partir de las redundancias tenemos que observar que una característica importante en la secuencia de ciertos sonidos y silencios es el ordenamiento de éstos, y tal como cita Meyer:

« Styles in music are basically complex systems of probability relations in which the meaning of any term or series of terms depends upon its relationships with all other terms possible within the style system.» [93]

Dentro del dominio musical para cuantificar ese balance entre la repetición y la aleatoriedad de una secuencia se utilizan herramientas provenientes de la estadística tales como:

- Media
- Variancia
- Desviación Estándar
- Auto-Correlación
- Momentos-k de la frecuencia
- Índice de sorpresa
- Coeficiente de Variación
- Rango Intercuartil

Aunque no entremos en detalle sobre la aplicación de estas medidas, a continuación vamos a describir otra manera de entender analíticamente los conceptos de repetición, en este caso a partir del estudio de leyes de potencia<sup>xxix</sup>.

---

<sup>xxix</sup>Una ley de potencias es un tipo especial de relación matemática entre dos magnitudes  $M$  y  $m$  del tipo:  $M = Cm^p$ , donde  $C$  es un número real y  $p$  otro número real al cual se le denomina como exponente.

El estudio de leyes de potencia dentro del dominio musical se traza originalmente a las investigaciones de Zipf [94], quien examinó la longitud de los intervalos entre repeticiones de notas y en el número de intervalos melódicos en un conjunto reducido de piezas musicales. Más tarde, Voss y Clarke estudiaron el comportamiento en forma de ley de potencias de las fluctuaciones de las notas y del volumen de éstas y encontraron que las fluctuaciones de notas en música tienen una densidad espectral a frecuencias que escalan como el inverso de la duración de la pieza musical. También examinaron por otro lado las fluctuaciones en la potencia sonora y en la frecuencia en varios ejemplos de audio pertenecientes a diversos géneros musicales tales como el jazz, blues, clásico, rock o en registros de radio, y a partir de ahí concluyeron que la ubicuidad del ruido  $1/f$  en dichos ejemplos representa como “la música mimetiza la manera en la que el mundo cambia con el tiempo” (ver figura A.3).

La popularización del estudio de leyes de potencia en música a partir de los trabajos de Voss y Clarke condujo a un amplio debate entorno a los orígenes de la auto-similaridad en ciertas estructuras musicales.

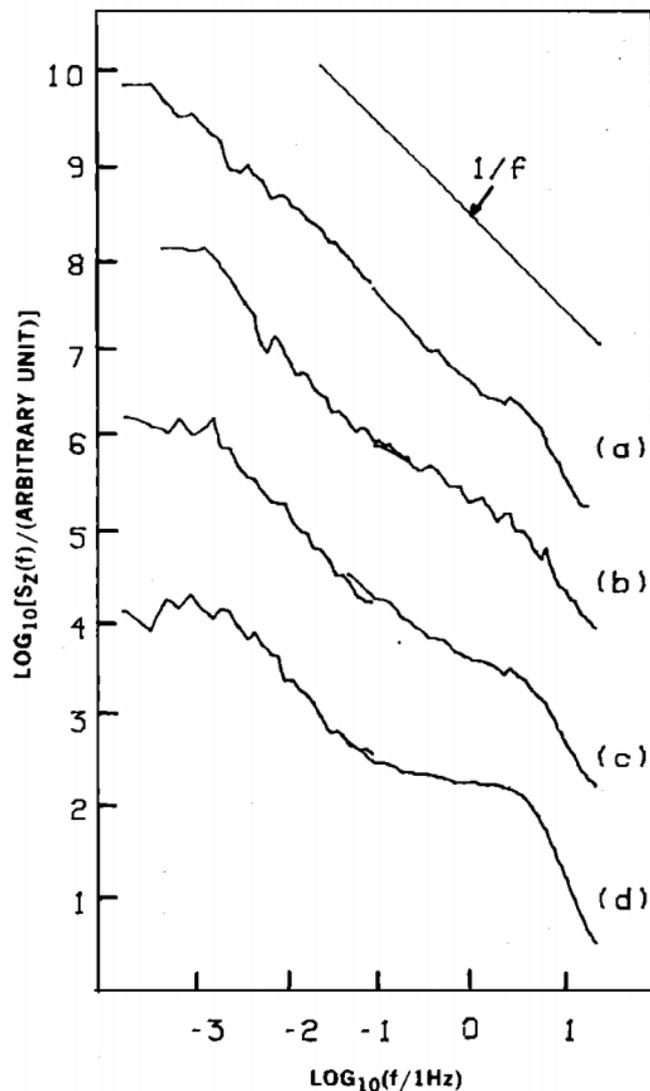
Segun Voss:

"Both music and  $1/f$ -noise are intermediate between randomness and predictability. Like fractal shapes there is something interesting on all (in this case, time) scales. Even the smallest phase reflects the whole."

Igualmente Voss y Clarke condujeron experimentos de escucha en ruido blanco, ruido  $1/f$  y ruido browniano y concluyeron que:

«  $1/f$ - music was judged by most listeners to be far more interesting than either the white music (which was ‘too random’) or the scale-like  $1/f^2$ - music (which was ‘too correlated’).»

Manaris [94] argumenta que una música estéticamente agradable requiere de la existencia de una estructura fractal en ella. De esta manera las consideraciones para generar



**Figura 1.32:** PSD de cuatro estaciones de radio: (a) Clásica, (b) Jazz, (c) Rock y (d) Noticias, siguiendo un ordenamiento de escala similar al ruido  $1/f$ .

música “agradable” conducirían hacia una estructura que manifestara este exponente de escala.

En términos generales, según Martin Gardner:

«The changing landscape of the world (or, to put it another way, the changing content of my total experience) seems to cluster around  $1/f$  noise. It is certainly not entirely uncorrelated, like white noise, nor is it as strongly correlated as brown noise. From the cradle to the grave my brain is processing the

fluctuating data that comes to it from its sensors. If I measure this noise at the peripheries of the nervous system (under the skin of the fingers), it tends, Mandelbrot says, to be white. The closer one gets to the brain, however, the closer the electrical fluctuations approaches  $1/f$ . The nervous system seems to act like a complex filtering device, screening out irrelevant elements and processing only the patterns of change that are useful for intelligent behaviour.»

[95]

Esta observación acerca de la predisposición humana para apreciar y crear estructuras musicales determinadas, las cuales paradójicamente son elegantes y sencillas debido a su propiedad de auto-semejanza de escala, ha motivado el estudio en otros investigadores. Por ejemplo Chanda & Levitin [96] explican la aparición de las leyes de potencia fractales (estructuras  $1/f$ ) en la música por el hecho de tener una base evolucionaria y biológica. Según éstos, el hecho de que la estructura  $1/f$  sea ubicua en la naturaleza hace que el cerebro humano haya evolucionado de tal manera para representar esta regularidad, tal como sucede en otras regularidades que se manifiestan en el dominio físico como por ejemplo la gravedad, la entropía, el momento y la noción de movimiento en el tiempo. De esta manera los compositores introducirían la estructura  $1/f$  internalizando las leyes de potencia en el mundo natural y por lo tanto compondrían su música para reflejar esas constantes. En este sentido este punto de vista refleja una visión en la que los cerebros humanos han evolucionado para encontrar las leyes de potencia como placenteras, ya sea en patrones fractales de copos de nieve, en flores o en series temporales como la música.

## 1.10. Síntesis Experimental de Ruidos y Procesos Estocásticos

Esta última sección de la parte introductoria de la tesis se enfoca en una exploración a nivel experimental sobre la generación de distintos tipos de ruidos. Esta sección se

comprende de dos subapartados. En el primero se revisa el estado del arte en torno a la diversidad de métodos de síntesis de distintos ruidos y se trata de aumentar dicha colección a través de la generación de ruidos, los cuales acuñamos con el término de ruido “no-convencionales”. En la segunda parte se desarrolla un sistema, creado a partir de algoritmos de *machine learning*, para la interpolación de sonidos desde el punto de vista de la complejidad sonora que se ha explorado en los apartados anteriores.

### 1.10.1. Ruidos No-Convencionales

Dentro del mundo del DSP existen varias plataformas para la generación de una gran diversidad de ruidos y sonidos estocásticos, tanto desde los dominios de software como de hardware. Sin embargo del grupo de procesos estocásticos y ruidos que se pueden construir a partir de funciones matemáticas solo una parte de éste está representado a nivel sonoro dentro de dichas plataformas de síntesis.

A continuación hacemos un breve repaso de algunos generadores de ruidos y sonidos estocásticos ya existentes para después ampliar dicha lista a través de la creación de la librería de código `Unconventional Stochastic Sounds`, la cual contiene nuevos sonidos pertenecientes a la transformación sonora de las series de tiempo de distintos ruidos y procesos estocásticos.

#### ▪ SuperCollider

Dentro de los `UGENS` generadores de sonido, existe una subclase perteneciente a `Stochastic` y dentro de ella hay 52 objetos pertenecientes a diferentes funciones generadoras de sonido. Algunos de estos objetos generan sonido por ejemplo a través de procesos estocásticos discretos tal como `MarkovSynth`. Otros generan sonido a través de fórmulas basadas en sistemas dinámicos lineales discretos tal como `Latoocarfian2DC` o bien a través del algoritmo `GENDY` descrito por Xenakis para producir música estocástica y implementado por Nick Collins [97]. Específicamente dentro de los `Noises` en cuestión se encuentran: `WhiteNoise`, `BrownNoise`, `GrayNoise`, `ClipNoise`, `PinkNoise`.

- **VST's**

Normalmente dentro de las aplicaciones de sintetizadores virtuales para DAW's (*Digital Audio Workstations*) los *pluggins* relacionados con la generación de ruidos utilizan métodos "hard-coded" para transformar ciertos ruidos a través de diferente métodos de manipulación de la señal como LFO's (*low-frequency oscillators*). No obstante podemos reseñar p.e. el *plugin* comercial *MeldaMNoise* el cual incorpora el ruido blanco y rosado, el *plugin* de Max4Live en Max-MSP de Blackstone, o el módulo de VCV Rack *Perlin Noise*.

- **Hardware Synths**

Dentro del mundo de los sintetizadores análogos existe igualmente una variedad de componentes, tanto DIY como en formato EuroRack, para la generación de ruidos y señales de ruido para control. Uno de los módulos más completos, para mencionar alguno, es el *Quantum Rainbow 2*, el cual incorpora: ruido blanco, marron, rojo, gris, violeta, azul, y quanta. Dentro del mundo de los sintetizadores DIY cabe mencionar el *Noise Cornucopia* de Ray Wilson (ver figura 1.33).

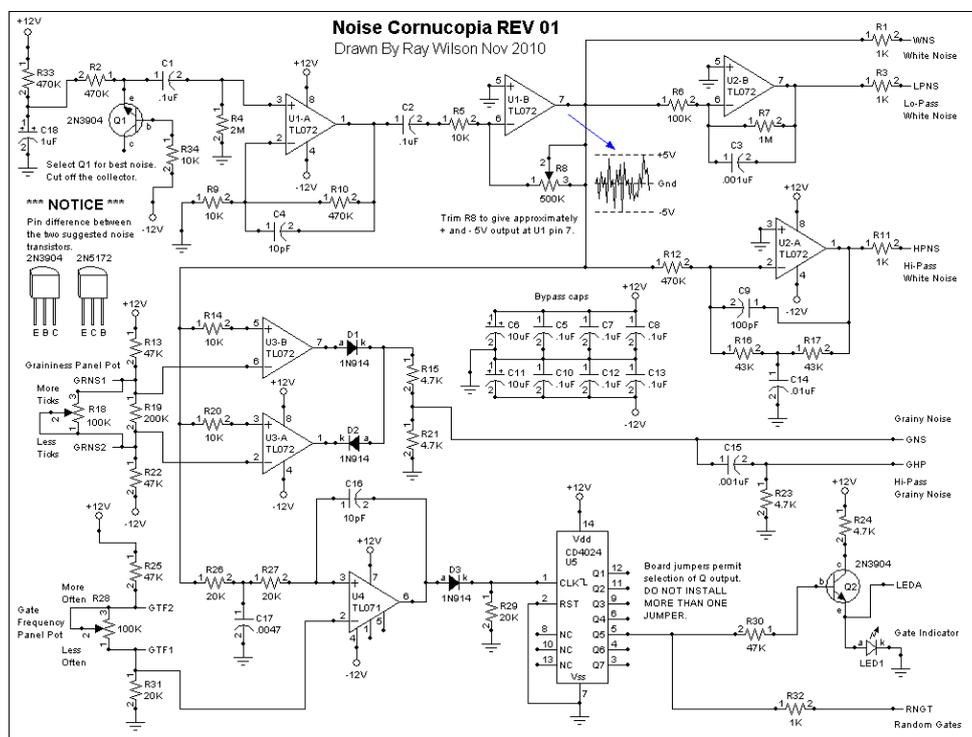


Figura 1.33: Diagrama electrónico para la construcción del modelo Noise Cornucopia DIY con White Noise, Pink-ish Noise, High Pass Noise, Grainy Noise y de Random Gates ajustables.<http://musicfromouterspace.com>

### 1.10.2. Unconventional Stochastic Sounds

Dentro de esta librería generada principalmente a partir de los paquetes `stochasticxxx` y `fbmxxxi` en Python existen dos grupos: Unconventional Noise y Unconventional Stochastic. A continuación mostramos la funciones de onda, y los espectrogramas de cada uno los sonidos creados en cada uno de los grupos, éstos en formato `*wav` se anexan en <https://carlestapi.hotglue.me>. La parte de código se refiere en los anexos A.

#### Unconventional Noise

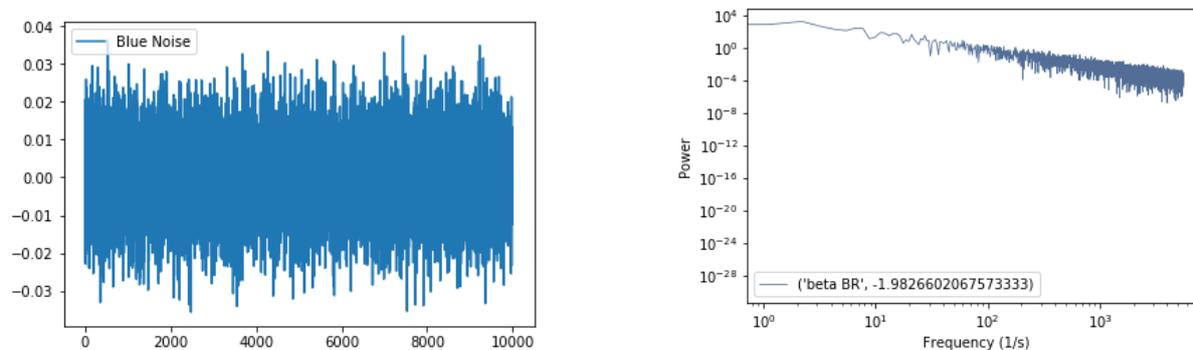


Figura 1.34: Blue Noise

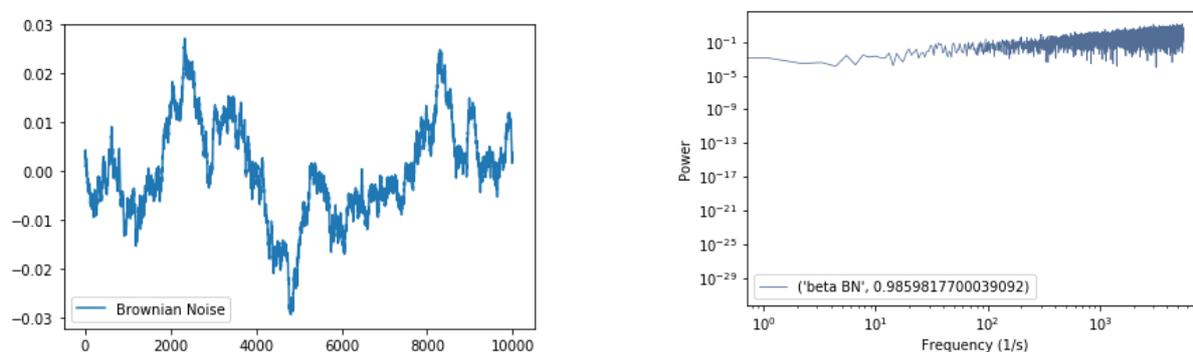


Figura 1.35: Brownian Noise

<sup>xxx</sup><https://pypi.org/project/stochastic/>

<sup>xxxi</sup><https://github.com/crflynn/fbm>

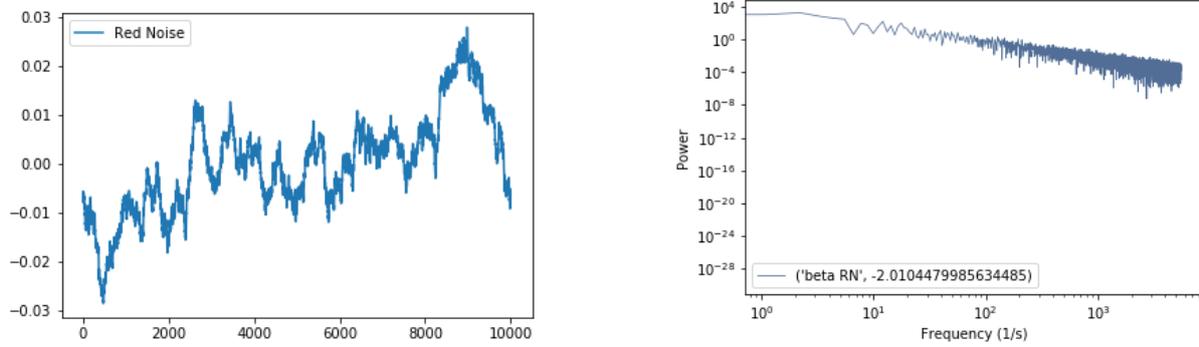


Figura 1.36: Red Noise

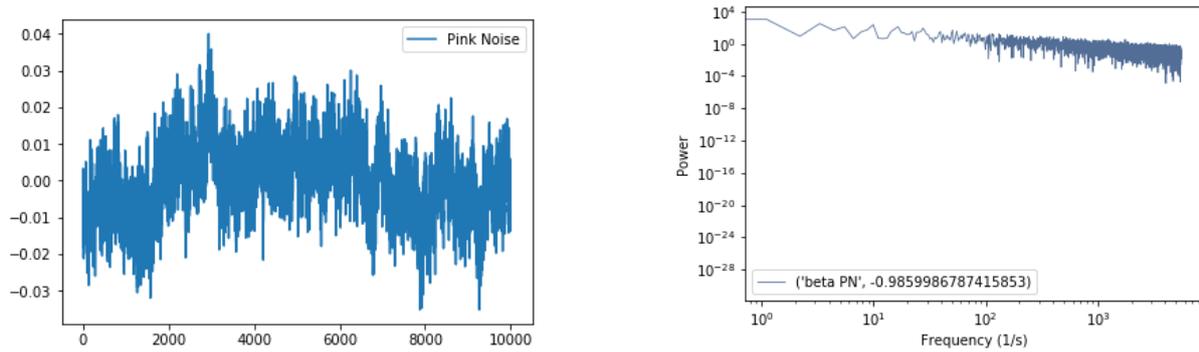


Figura 1.37: Pink Noise

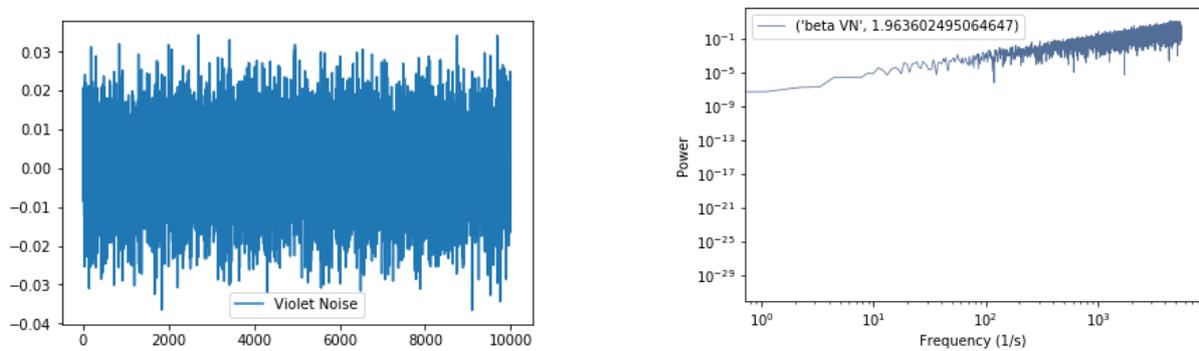


Figura 1.38: Violet Noise

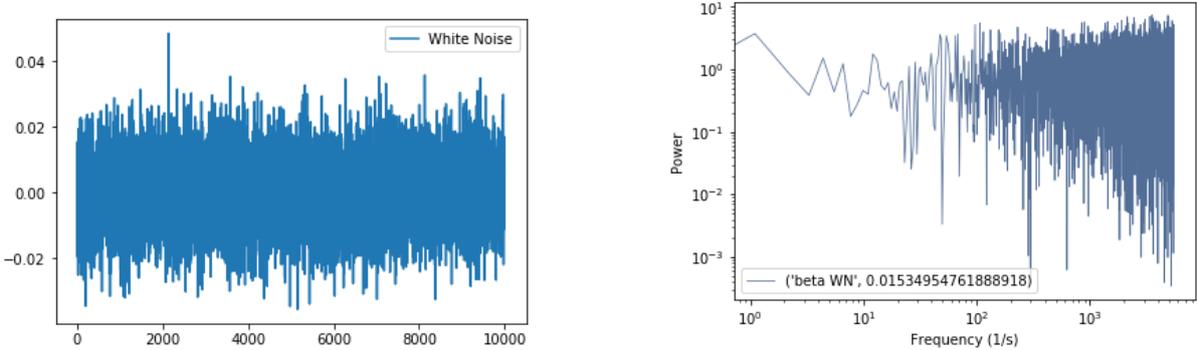


Figura 1.39: White Noise

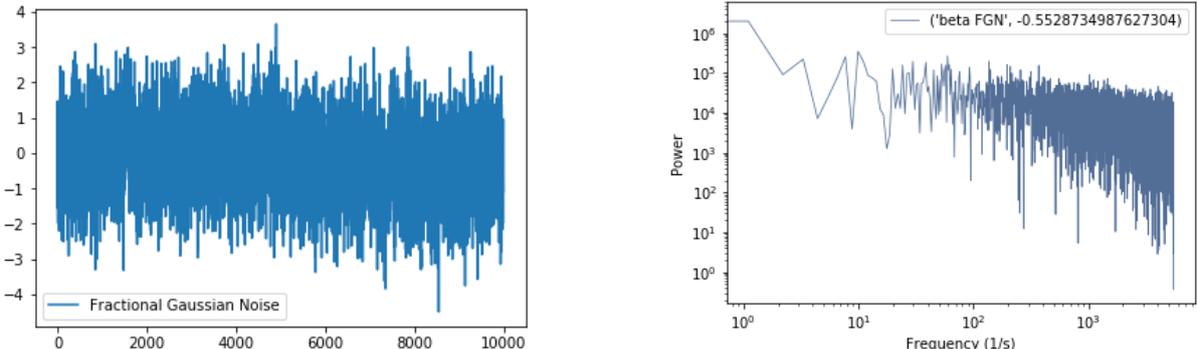


Figura 1.40: Fractional Gaussian Noise

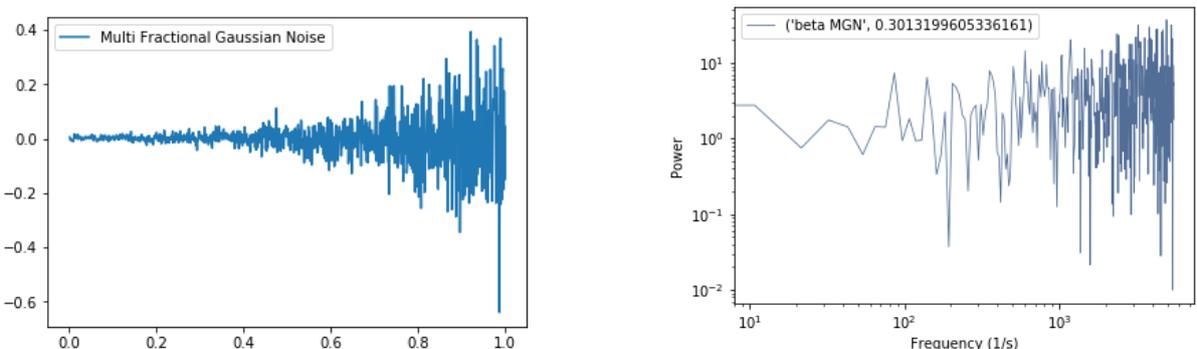


Figura 1.41: Multi Fractional Gaussian Noise

### Unconventional Sthocastic

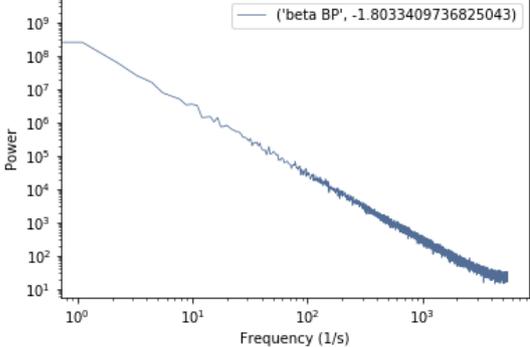
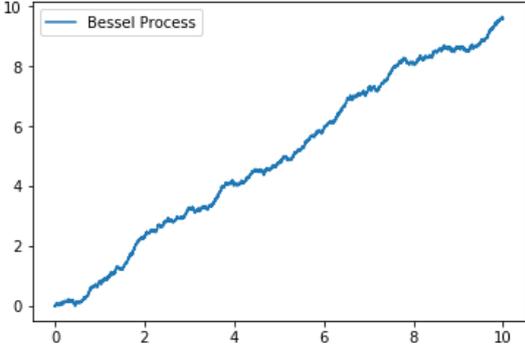


Figura 1.42: Bessel Process

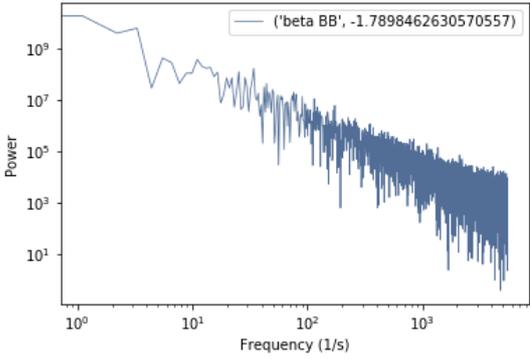
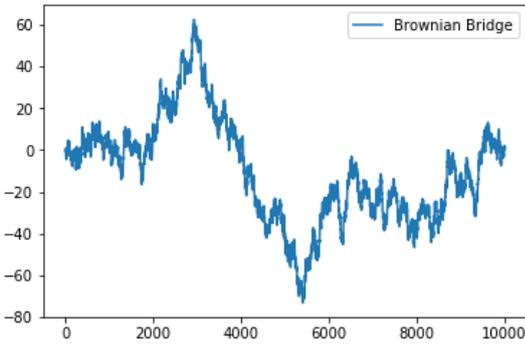


Figura 1.43: Brownian Bridge Process

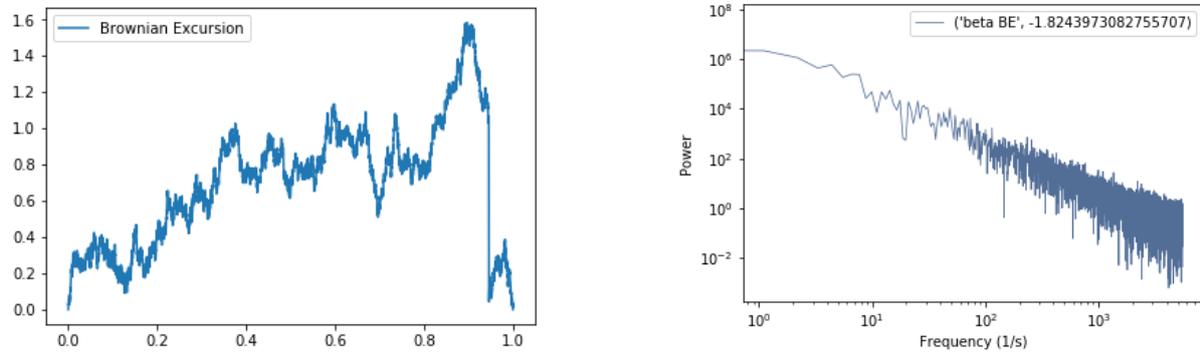


Figura 1.44: Brownian Excursion Process

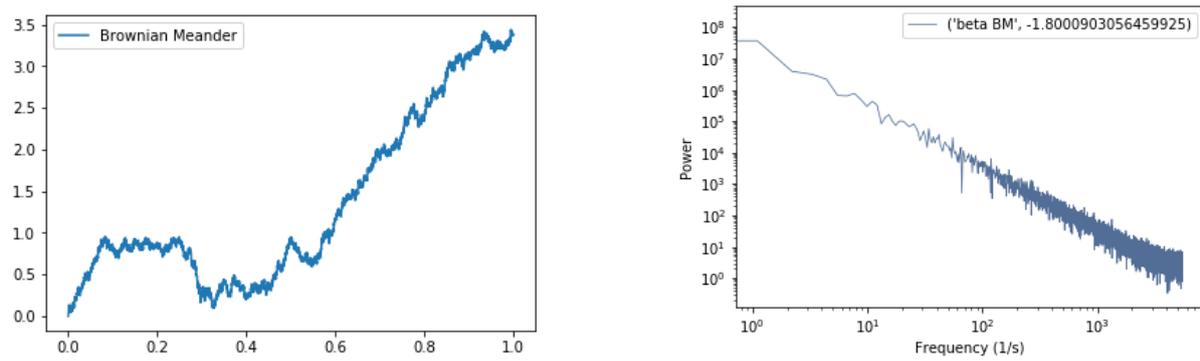


Figura 1.45: Brownian Meander Process

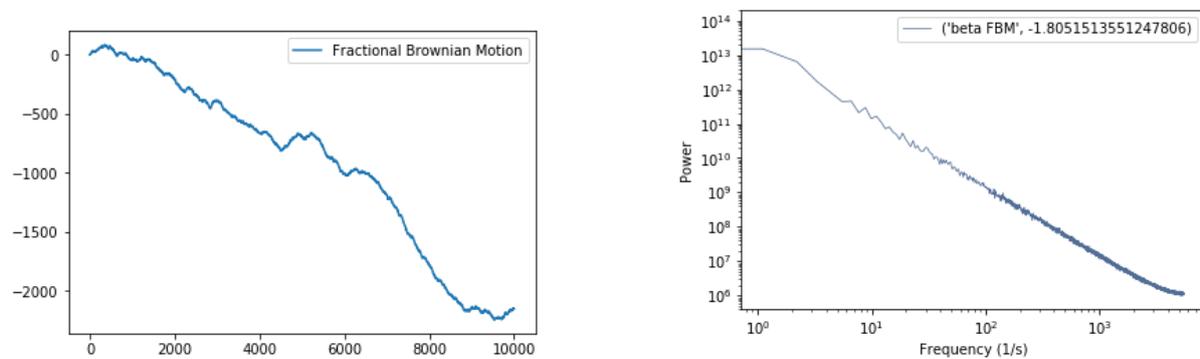


Figura 1.46: Fractional Brownian Motion

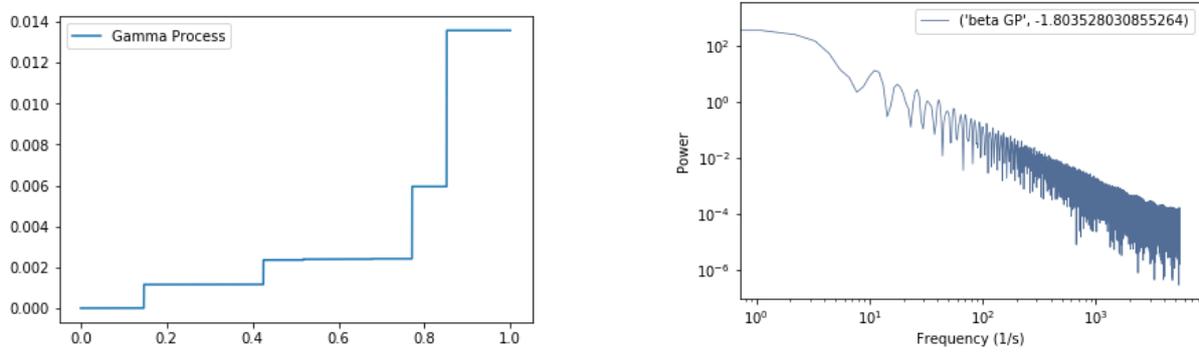


Figura 1.47: Gamma Process

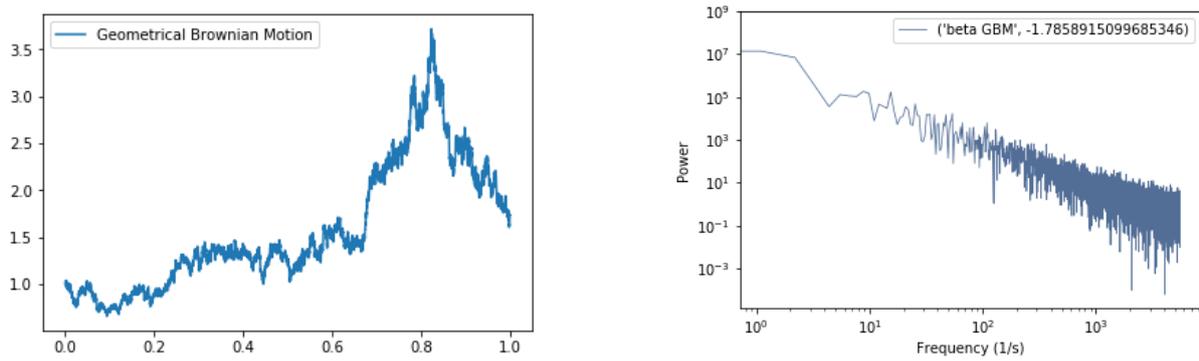


Figura 1.48: Geometrical Brownian Motion

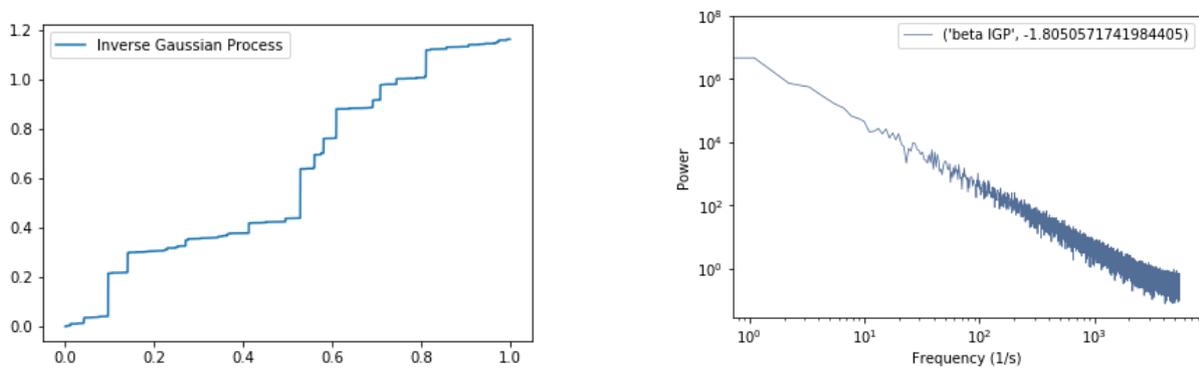


Figura 1.49: Inverse Gaussian Process

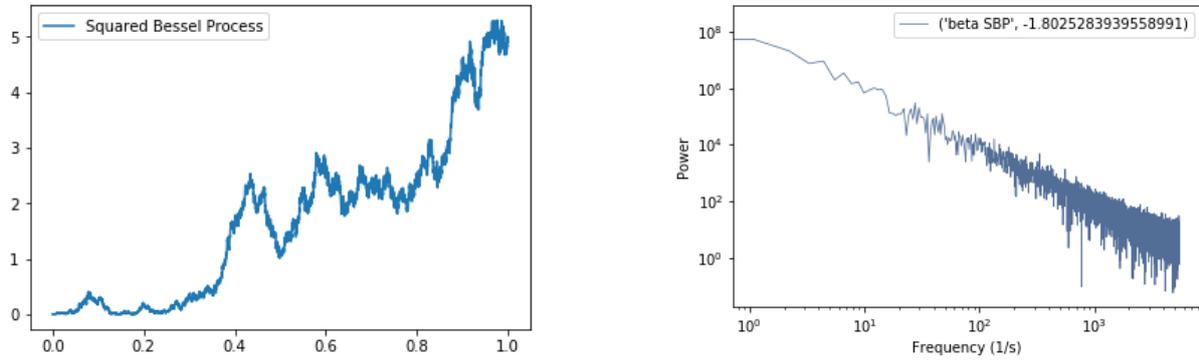


Figura 1.50: Squared Bessel Process

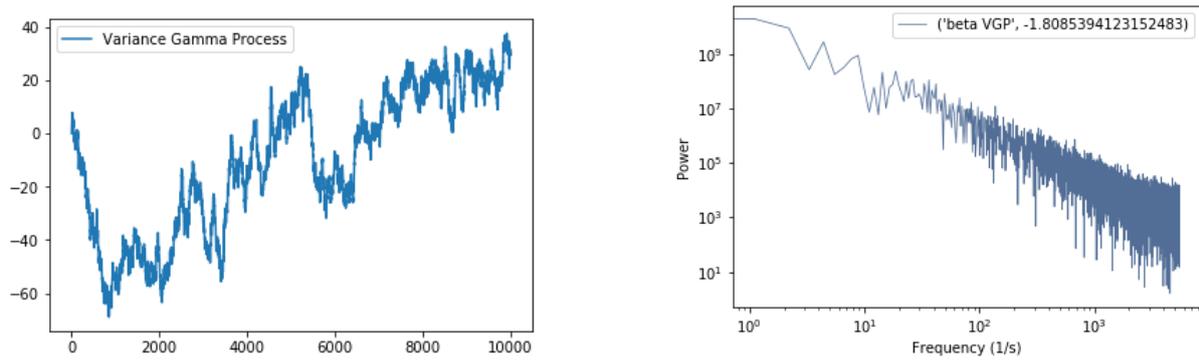


Figura 1.51: Variance Gamma Process

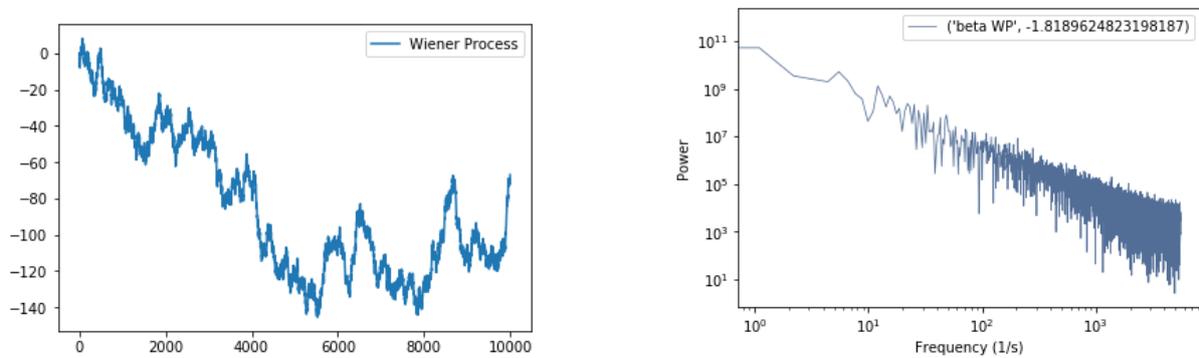


Figura 1.52: Wiener Process

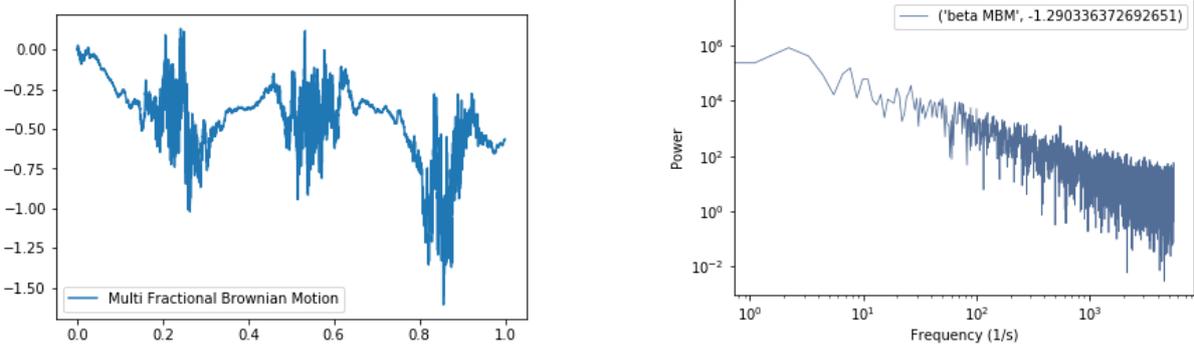


Figura 1.53: Multi Fractional Brownian Motion

### 1.10.3. Complexity Interpolator

En esta última sección del capítulo presentamos la creación de un sistema para la interpolación de sonidos basado en parámetros de complejidad sonora. Este sistema está principalmente basado en dos algoritmos de *machine learning* los cuales permiten obtener una multiplicidad de salidas sonoras concurrentes a los parámetros de complejidad que conforman la entrada en el sistema.

El primero algoritmo es el E-Z NSynth desarrollado por *GoogleBrain* y *DeepMind* a través de la librería *Magenta* en *Python*, la cual utiliza herramientas de *deep learning* desarrolladas en *Tensor Flow*. El uso de E-Z NSynth está detallado en el paper “Neural Audio Synthesis of Musical Notes with WaveNet Autoencoders”[98].

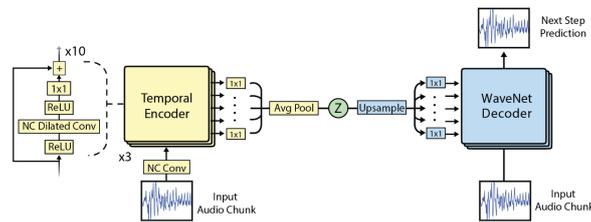
Sin entrar en detalles, este sistema generativo profundo permite aprender de secuencias temporales de audio a partir del algoritmo *WaveNet*<sup>xxxii</sup>. Esta red auto-regresiva profunda de convoluciones dilatadas modela *samples* de sonidos (de la misma manera que los filtros no-lineales de impulsos infinitos), para aprender de las secuencias temporales propias de los *samples* sin la necesidad de características o condicionamientos externos.

Este sistema nos sirve a nosotros para generar una interpolación a partir del aprendizaje temporal intrínseco entre dos *samples* de sonido. En nuestro caso (figura 1.55), dentro de la multiplicidad de posibilidades, utilizamos el *sample* de una onda sinusoidal de 1000Hz de frecuencia como representante del sonido con la mínima complejidad (Sonido S, en el diagrama 1.62). Para el sonido con la máxima complejidad escogemos un *sample* de ruido  $1/f$  (Sonido C). Toda la parte de código utilizada referente a *Nsynth* se puede encontrar en el anexo A.3.

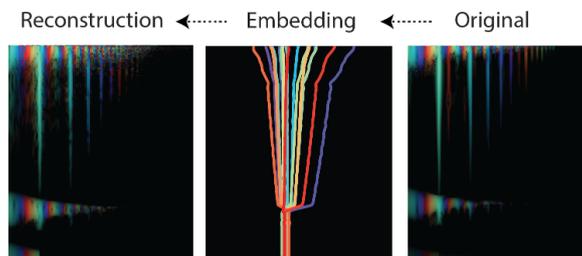
Una vez generada la interpolación obtenemos la onda del nuevo sonido interpolado entre la onda sinusoidal y la del ruido  $1/f$  (figura 1.56).

A partir de aquí, comparamos la PSD de la nueva onda correspondiente al sonido interpolado con el de la onda sinusoidal y el del ruido  $1/f$ . En la figura 1.57 vemos las 3 PSD's y la pendiente  $\beta = -2,1$  resultante de la interpolación del sonido sinusoidal con

<sup>xxxii</sup><https://deepmind.com/blog/wavenet-generative-model-raw-audio/>



(a) La red neuronal profunda utiliza 30 capas ocultas creando finalmente estructuras temporales de 16 dimensiones para cada uno de los 512 subsamples de un *sample* [98].

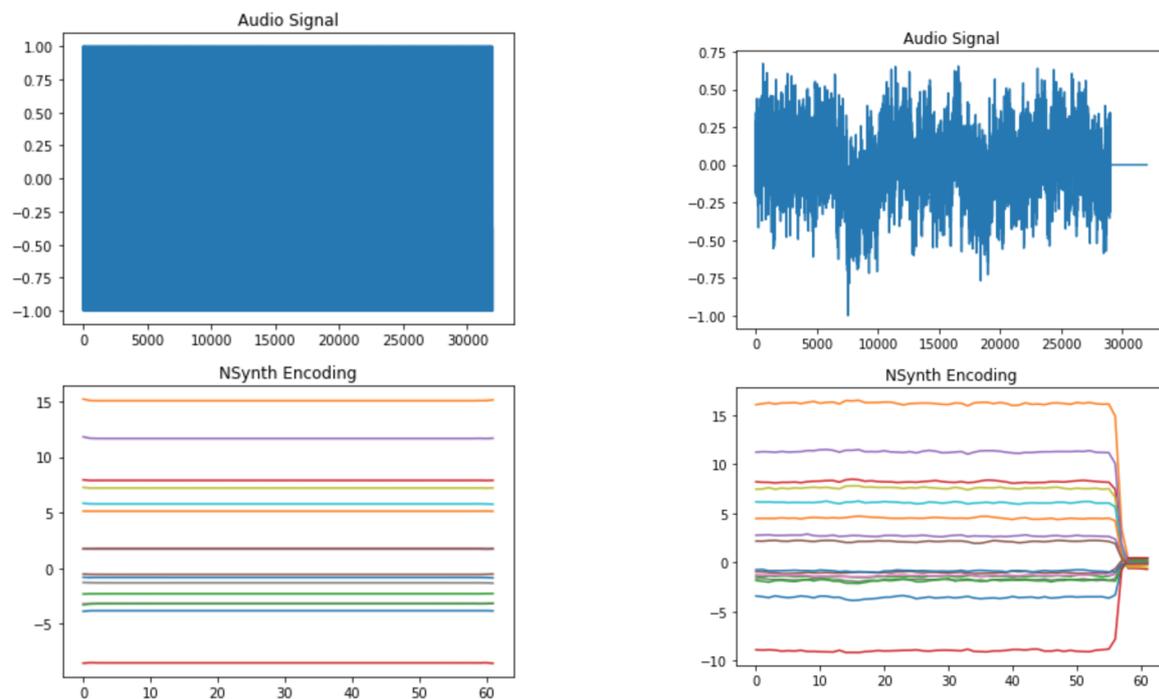


(b) Espectrogramas tipo CTQ con la magnitud representada por la intensidad y la frecuencia instantanea por el color. Para los embeddings, los diferentes colores representan los 16 dimensiones para 125 pasos temporales [98].

**Figura 1.54:** Detalle del sistema WaveNet de Nsynth para el aprendizaje de estructuras temporales latentes de audio.

$\beta = -\infty$  y el ruido  $1/f$  con  $\beta = -1$ .

El segundo algoritmo, también del equipo de la librería Magenta/TensorFlow, está basado en MusicVAE, el cual permite crear una paleta de partituras musicales a través de una red neural recurrente [99]. Este algoritmo nos permite a nosotros aprender sobre la estructura temporal de una secuencia MIDI a partir de un decodificador jerárquico. Más allá de esto, el sistema permite hacer una fusión de dos secuencias MIDI a partir de una red neural recurrente la cual genera salidas a partir del aprendizaje de la secuencias de entrada iniciales. Parte de la arquitectura del sistema de aprendizaje automático se muestra en la



(a) *samples* de onda harmónica sinusoidal de 1000Hz y su embedding temporal.

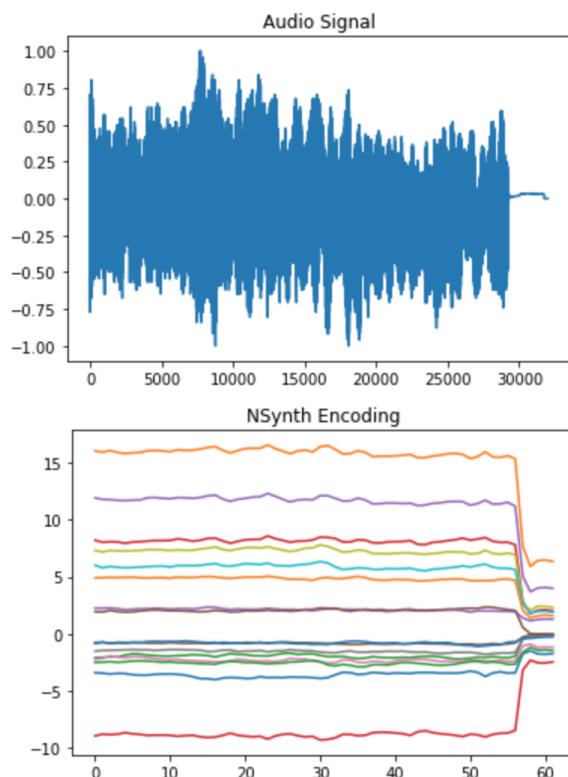
(b) *Sample* de ruido  $1/f$  con su embedding temporal.

**Figura 1.55:** *Samples* utilizados para generar las interpolaciones de sonido en NSynth.

figura 1.58 y se puede consultar a más detalle en: <https://magenta.tensorflow.org/music-vae>.

De la misma manera que en el sistema anterior, hemos generado una interpolación de dos sonidos, en este caso vamos a interpolar dos secuencias MIDI con diferentes extremos de complejidad. La secuencia MIDI más simple y sencilla es una en la cual en el tiempo se repite la misma nota (en nuestro caso escogemos C3 correspondiente a MIDI=48). En el otro extremo la secuencia MIDI más compleja, al igual que el ruido  $1/f$  en el sonido, pertenecería a una secuencia que siguiera el mismo espectro del ruido  $1/f$  pero discretizado en tiempo en este caso.

Para obtener este ruido  $1/f$  discreto, dentro del segundo algoritmo implementamos un código para generar notas MIDI con un espectro de potencia  $1/f$  basado en el algoritmo descrito por Gardner [95], el cual utiliza un sistema para generar secuencias a través de

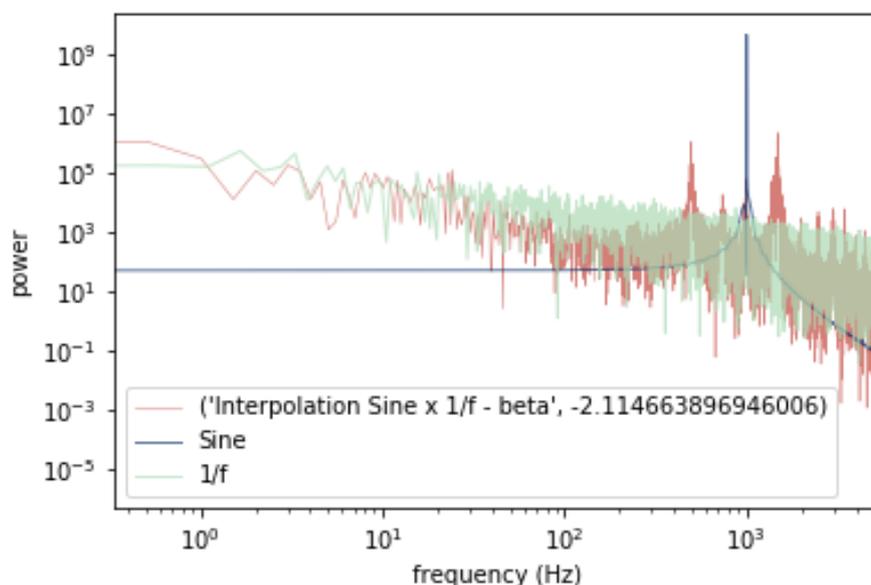


**Figura 1.56:** Onda y embedding temporal de la interpolación resultante de la onda sinusoidal con la del ruido  $1/f$ .

lanzamientos de dados.

A continuación explicamos brevemente este algoritmo, el cual consiste en utilizar un número dado de dados y sumar sus valores, explotando el hecho de que las series  $1/f$  pueden ser modeladas como sumas de variables aleatorias con correlaciones específicas [100]. En el algoritmo en cada paso solo se lanzan ciertos dados , i.e. solo los que corresponden a un cambio de bit cuando se escribe la secuencia de números enteros en base 2. Como consecuencia de que algunos dados se mantienen inalterados en períodos de tiempo más grandes que otros, obtenemos la propiedad de que la varianza es inversamente proporcional a la frecuencia. (El algoritmo se describe en la figura 1.59).

Para nuestro algoritmo en `Python` utilizamos una variación de [100] con 8 dados y la restricción que los intervalos generados por las lanzamientos de los dados no caigan en una escala cromática sino armónica (ver anexo A.3 para una descripción del *script*). Así



**Figura 1.57:** PSD's de la onda sinusoidal, la del ruido  $1/f$  y la onda interpolada final.

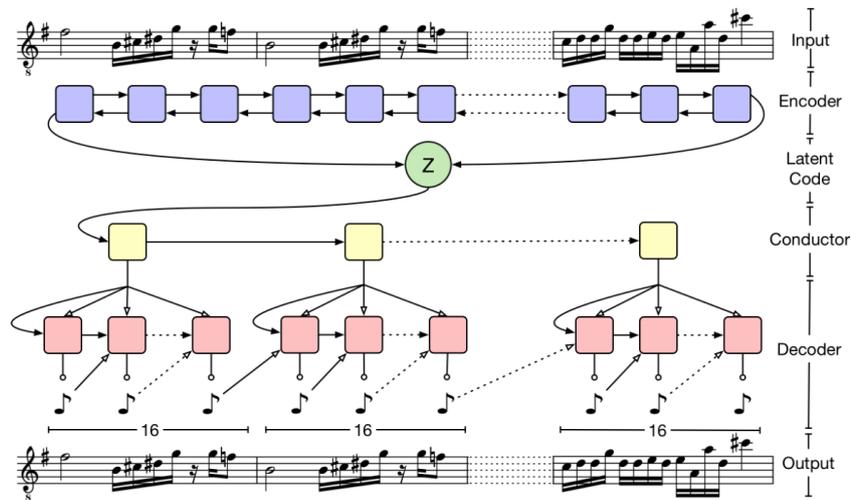
de esta manera generamos la figura 2.2 la cual vamos a utilizar, en su transposición MIDI que generamos a través de la librería `miditime.py`, como una entrada de nuestro sistema junto al midi generado a partir de una misma secuencia en el tiempo de  $\text{MIDI}=48$ .

Ahora que ya tenemos dos secuencias MIDI de entrada, una MIDI sencilla  $\mathbb{S}$  correspondiente a una secuencia estable, y otra compleja  $\mathbb{C}$  correspondiente a la realización discreta de un ruido  $1/f$ , generamos las interpolaciones a través del algoritmo MusicVAE (ver código en anexo A.3). A partir de aquí obtenemos como vemos en la figura 2.2 un conjunto de 4 secuencias distintas posibles.

En estas 4 secuencias correspondientes a distintos *samples* o momentos en el tiempo de la secuencia MIDI 1 con la secuencia MIDI 2, observamos la emergencia progresiva de la secuencia  $1/f$  a partir de la secuencia monótona inicial.

Finalmente la parte última de nuestro sistema *Complexity Interpolator* consiste en el ensamblaje del sonido generado a través del primer algoritmo NSynth con la secuencia MIDI generada a través del algoritmo MusicVAE. De esta manera el sistema final *Complexity Interpolator* queda diagramado en la figura 1.62.

Finalmente para *samplear* la secuencia interpolada de la onda sinusoidal y la  $1/f$  en



**Figura 1.58:** Utilizando esta arquitectura el sistema es capaz de reconstruir, *samplear* e interpolar secuencias melódicas MIDI de 2 barras.

la secuencia MIDI interpolada, podemos utilizar cualquier dispositivo de *sampleo* MIDI digital como vemos en la figura 1.63. Todos los audios \*.wav se pueden encontrar en <https://carlestapi.hotglue.me>

---

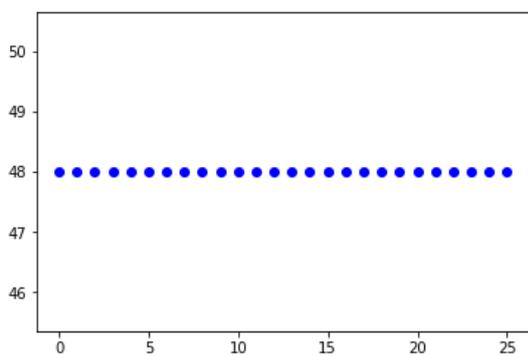
```

Input:  $N$  a sequence length,  $nbDice$  a number of dice,
           $maxDice$  the maximum dice value
Output: A sequence of  $N$  values in
            [ $nbDice, nbDice.maxDice$ ] with a  $1/f$ 
            spectrum
 $result \leftarrow$  new integer array of length  $N$ 
 $diceValues \leftarrow$  new integer array of length  $nbDice$ 
for  $i = 0, \dots, N - 1$  do
  for  $d = 1, \dots, nbDice$  do
    if ( $d^{th}$  bit of  $i$ )  $\neq$  ( $d^{th}$  bit of  $i - 1$ ) then
      // toss die number  $d$ 
       $diceValues(d) \leftarrow$  Random integer
                          in  $[1, maxDice]$ 
    // sum all dice
   $result(i) \leftarrow \sum_{k=1}^{nbDice} diceValues(k)$ 
return  $result$ 

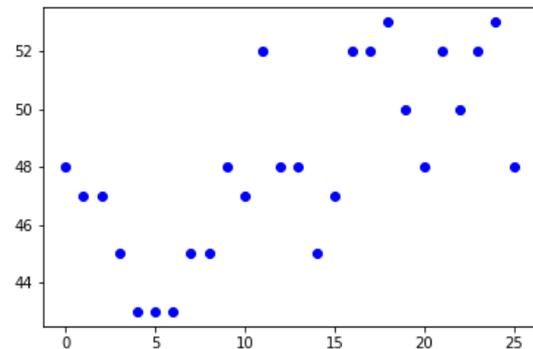
```

---

**Figura 1.59:** Algoritmo de Voss descrito por Gardner e implementado en BackJava en [100]. En nuestro caso lo implementamos en Python con 8 dados y con restricción harmónica.

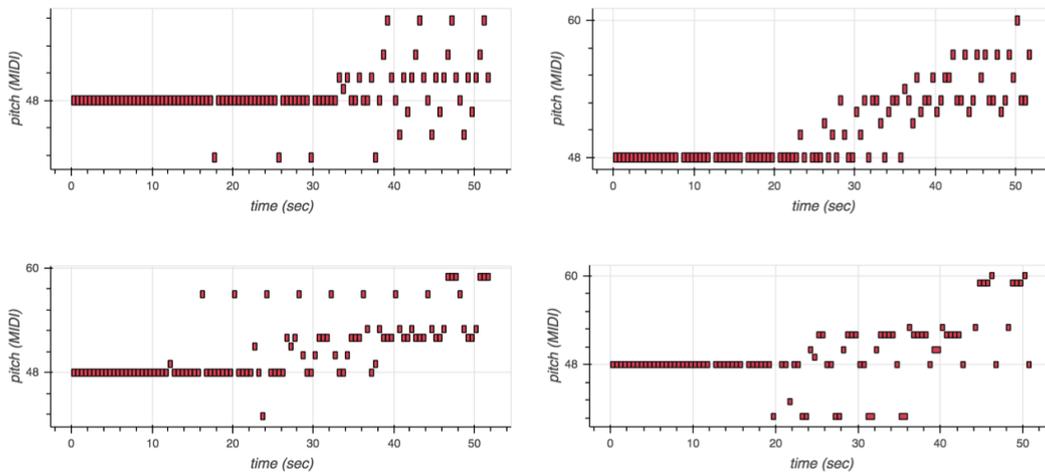


(a) Secuencia MIDI sencilla con el mismo valor 48 en los 25 pasos temporales

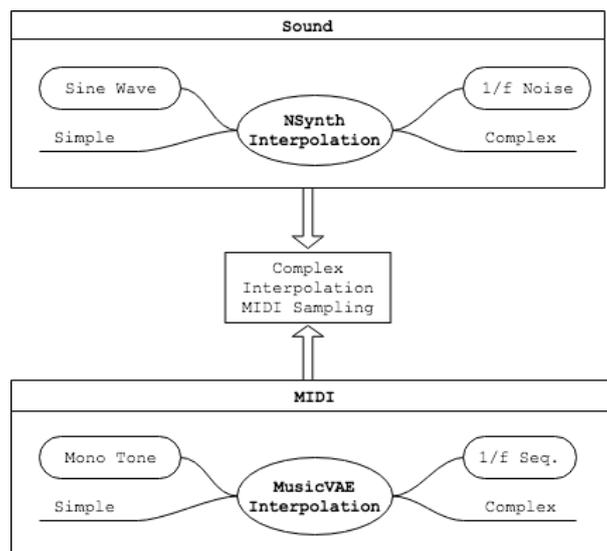


(b) Secuencia MIDI compleja con espectro  $1/f$  de acuerdo al algoritmo de Voss. La nota tónica es 48.

**Figura 1.60:** Conjunto de MIDI's que conforman la entrada para el algoritmo MusicVAE.



**Figura 1.61:** 4 secuencias MIDI resultantes de la interpolación de las secuencias originales. Como observamos estas interpolaciones se construyen en el tiempo de manera que empiezan con la entrada de la secuencia 1 inicial transformándose progresivamente hasta la secuencia de la entrada 2.



**Figura 1.62:** Diagrama esquemático del sistema Complexity Interpolator.

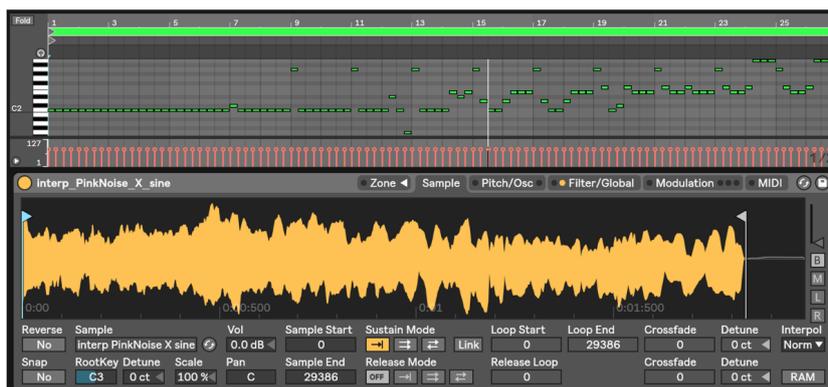


Figura 1.63: *Sampleo* de MIDI final del sistema Complexity Interpolator en Live.

## Capítulo 2

# Diseño de Interacciones Sónicas en Sistemas de BactoComputación

En la introducción de esta tesis hemos sondeado algunas herramientas formales para intentar describir y analizar las propiedades emergentes de ciertos fenómenos, pertenecientes a los sistemas complejos, desde un punto de vista sonoro. A lo largo de una primera exploración hemos buscado relacionar las escuchas empíricas, i.e. las señales que generan dichos fenómenos, con ciertas medidas formales de su complejidad.

Debido a una naturaleza intrínseca de tránsito entre estados, tanto de los fenómenos emergentes que exhiben ciertos sistemas complejos como de los fenómenos que ocurren dentro de los dominios sonoros, hemos visto la necesidad de incluir en nuestras descripciones la dimensión conceptual del tiempo. Consecuentemente hemos pasado de un punto de vista sistémico centrado en entidades y en estados a uno orientado hacia los procesos y hacia las dinámicas.

En la parte final de la introducción, y a modo de ejemplo demostrativo, hemos programado un modelo sonoro a partir de un formalismo que codifica cómo ciertas funciones matemáticas evolucionan en el tiempo. Así a través de la instanciación de los exponentes de densidad espectral y de las funciones de autocorrelación de ciertos ruidos en los dominios temporales y frecuenciales, junto a un sistema de interpolación basado en al-



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

goritmos de *machine learning*, hemos propuesto un sistema que es capaz de generar una multiplicidad de estructuras sonoras concurrentes a su complejidad.

Este ejemplo que parte de un modelo matemático perteneciente al campo de estudio de las series temporales, y que es utilizado finalmente para crear una abstracción sonora simbólica de lo que es la complejidad temporal, y de manera colindante de lo que es la memoria en un evento acústicamente sensoperceptible, nos sirve como punto de partida para empezar a estrechar nuestra pregunta de investigación alrededor de si es posible entender y percibir la emergencia desde el marco de los fenómenos sonoros.

Partiendo del substrato teórico y conceptual desarrollado en el capítulo introductorio, en este capítulo vamos a desplazarnos hacia los terrenos experimentales para explorar cómo es posible diseñar nuevos sistemas sonoros a través del uso e implementación de ciertas propiedades emergentes que se observan en determinados procesos pertenecientes a los sistemas complejos.

De esta manera, si en la introducción nos preguntábamos si era posible entender la emergencia a partir de un análisis de los patrones y de las estructuras dentro de un marco sonoro, ahora vamos a intentar responder cómo es posible utilizar experimentalmente estas propiedades emergentes que observamos en ciertos fenómenos naturales para “ingenierizar” sistemas orientados a la creación de nuevos modelos, técnicas y dispositivos de representación sonora.

Subrayando y resumiendo lo dicho a modo de pregunta de investigación: **¿Es posible utilizar experimentalmente ciertas propiedades emergentes inherentes a los sistemas complejos, i.e. “ingenierizarlos”, para crear nuevos dispositivos sonoros?**

Si en el ejemplo propuesto en el capítulo introductorio partiendo de la descripción matemática de un fenómeno emergente hemos programado un sistema sonoro, en este capítulo abordaremos algunas maneras posibles de emplear ciertas propiedades temporales de sincronización, que observamos específicamente dentro del ámbito de la biología sintética, para el diseño de un sistema sonoro que hibrida las tecnologías no convencionales

de bactocomputación (las cuales describiremos en 2.3) junto a las de síntesis de audio análogo y digital.

Para plantear inicialmente cómo es posible utilizar estos nuevos sistemas de bacto-computación, los cuales se enmarcan dentro del campo de estudio de lo que se conoce como computación no convencional, partiremos con una introducción a los sistemas de procesamiento de información convencionales en relación a los cómputos no convencionales.

Para ubicarnos brevemente dentro de la distinción entre estos dos tipos de cómputos, podemos reinterpretar de nuevo el ejemplo final del capítulo introductorio en otros términos conceptuales. Como hemos visto en ese ejemplo, se ha diseñado primeramente un algoritmo, el cual instruye a la computadora en lo que exacta y precisamente tiene que hacer, actuando sobre los datos digitales paso a paso, para producir una salida bien definida. Después, hemos codificado ese algoritmo en un lenguaje de programación determinado (Python), lo hemos ejecutado en un computador comercial (MacBook), para finalmente escuchar la salida física sonora mediante un altavoz.

En contraposición, partiendo de un modelo de computación no convencional, el dispositivo sonoro que planteamos explorar en este capítulo va más allá de este paradigma, ya que durante su desarrollo vamos a partir de conceptos diferentes de:

- **Hardware** - La computación como un proceso de carácter inherentemente físico puede utilizar las diversas propiedades físicas subyacentes en un determinado material <sup>1</sup>. En nuestro caso aprovecharemos ciertas propiedades oscilatorias que se observan en un sistema biológico sintético capaz de sincronizarse, específicamente en una construcción genética que se basa en un sistema conocido como *represilador*.
- **Software** - Los algoritmos inspirados en propiedades biológicas se pueden modelar computacionalmente de una manera diferente a los métodos digitales tradicionales,

---

<sup>1</sup>Afirmación que resuena con las teorías filosóficas del pensamiento en las que se considera que “todo es información” o bien que “todo es una computadora”, pero ¿puede una roca computar?[101], ¿es el universo una gran computadora (cuántica)?[102]

los cuales se fundamentan en una lógica binaria exacta e “inalterable” <sup>11</sup>. Partiendo de la manera en que funcionan ciertos procesos biológicos nos encontramos con otras lógicas de carácter más difuso e inexacto que podemos utilizar a nuestro favor para implementar otra clase de algoritmos.

- **Emergencia** - La computación convencional no se considera un sistema estrictamente emergente ya que las funcionalidades que obtenemos como salida de un sistema son precisamente las que están ya preprogramadas. La computación en substratos biológicos se orienta a formas de computación emergente donde los patrones globales resultantes o las dinámicas son una propiedad emergente implícita del sistema en vez de ser explícitamente programadas.

En resumen, a lo largo de este capítulo vamos a plantear cómo es posible “ingenierizar” las propiedades emergentes para el desarrollo de un sistema de computación no convencional en substratos biológicos de bacterias y aplicarlas al diseño de dispositivos híbridos bacteoelectrónicos orientados a la síntesis y al diseño de interacciones sonoras.

## 2.1. Génesis Clásica y Futuros No Convencionales en Computación

Partiendo del campo de estudio dentro del cuál se enmarca esta tesis, i.e. la tecnología musical, podemos considerar que ésta se fundamenta primordialmente en los grandes avances que hubo dentro de las ciencias de la computación durante la primera mitad del siglo pasado. La tecnología que se deslinda de esas investigaciones, a partir de la segunda mitad de siglo, más allá de ser una parte integral en gran medida de nuestro día a día, constituye el substrato en la mayor parte de los sistemas de producción, registro

---

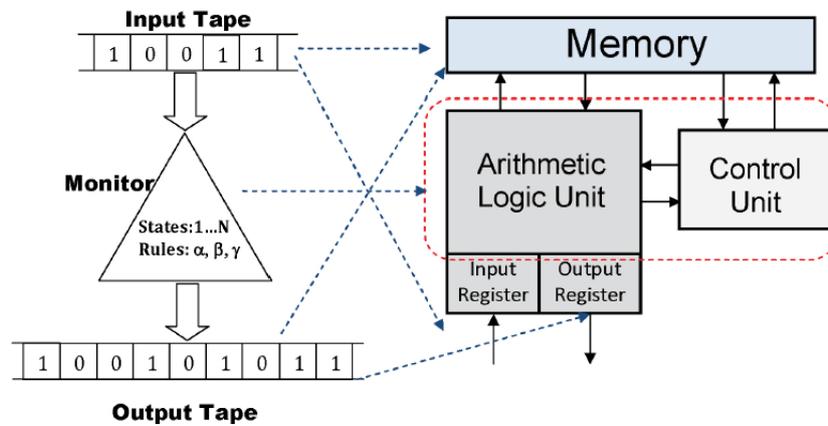
<sup>11</sup>Lo que se conoce como lógica digital en la cual se aplica la lógica booleana de 0's y 1's a circuitos de hardware electrónico que consisten en puertas lógicas conectadas para formar un diagrama de circuito. Claude Shannon fue quien demostró esta equivalencia entre álgebra y electrónica en su tesis “A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits” del año 1938 [103].

y distribución de música en la actualidad. Para entender y explorar nuevos paradigmas de tecnologías computacionales no convencionales aplicadas a los dominios sonoros es conveniente por lo tanto revisar brevemente la génesis de esta computación clásica.

En sus orígenes el término computación se refería a operarios (humanos), los cuales seguían un conjunto de reglas para resolver problemas matemáticos o de carácter lógico-formal. Es a partir de principios del siglo XX cuando se empieza a utilizar el término para referirse específicamente a ciertas máquinas orientadas a resolver dichas tareas: las computadoras. Durante los años 30, asentando las bases teóricas de la computación convencional, Alan Turing formalizó el comportamiento de las computadoras, los cuales operan bajo ciertos comportamiento “efectivos”, i.e. a través de secuencias finitas y discretas de reglas bien definidas. Esta formalización llevó a definir un modelo de computación abstracta que en la actualidad se conoce como Máquina de Turing [104]. Después de esto en los años cuarenta John von Neumann desarrolló una arquitectura computacional para computadoras con programas de almacenado, los cuales guardan las instrucciones del programa en una memoria electrónica [105] (ver figura 2.1).

Mientras que la máquina de Turing es una máquina de carácter teórico inventada para explorar el dominio de los problemas matemáticamente computables, la arquitectura de von Neumann es un esquema que sirve para el desarrollo técnico y la construcción de dispositivos reales de cómputo. Ambos trabajos, los de Turing y los de von Neumann, se consideran como los fundamentos de lo que hoy en día son las computadoras comerciales, en los cuales el substrato conceptual fundamental ha permanecido relativamente inalterado hasta hoy en día.

Más allá de estos dos ejemplos seminales dentro de la historia de la computación existen desarrollos anteriores enfocados a la construcción de máquinas de cómputo en diferentes substratos no electrónicos. Para mencionar algunos ejemplos podemos citar lo que se considera como la primera computadora: el ábaco, o bien dentro de las civilizaciones andinas, el quipu [107]. Otro de los ejemplos más relevantes es la máquina analítica de carácter mecánico inventada por Charles Babbage en el año 1836, para la cual Ada

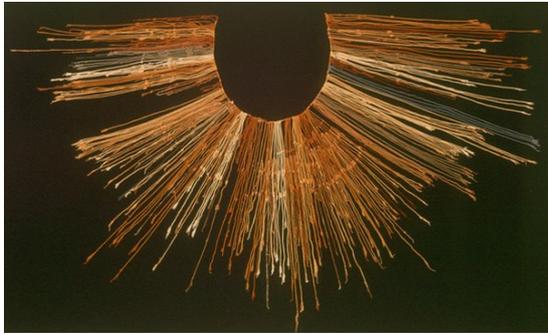


**Figura 2.1:** Máquina de Turing y arquitectura de von Neumann para un computador de uso general [106]. La Máquina de Turing es un dispositivo hipotético que manipula un conjunto de símbolos de acuerdo a un conjunto finito de reglas (según la tesis de Church-Turing una función es algorítmicamente computable si y sólo si es computable por una Máquina de Turing). La arquitectura de von Neuman se compone de una CPU y un bloque de memoria. La CPU está compuesta de una Unidad Lógica Aritmética (ALU) que realiza las operaciones esenciales, y la unidad de control que gestiona las operaciones de ALU y su interacción con la memoria.

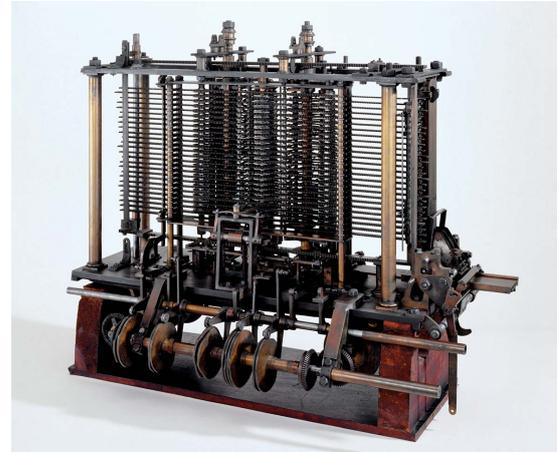
Lovelace fue la primera que, viendo su capacidad para realizar cálculos matemáticos de carácter general, programó un primer algoritmo para ser implementado en dicha máquina [108] (ver figura 2.2).

Paralelamente a la clase de máquinas digitales que se basan en cálculos de Turing y en arquitecturas tipo von Neumann, las cuales se implementan en la actualidad mediante el uso de componentes construidos a partir de materiales semi-conductores (CMOS), hay un campo de estudio creciente enfocado en el estudio de los llamados cálculos no estándar, conocidos también como cálculos no convencionales. Estos últimos abarcan, entre otros dominios, la computación en una gran variedad de sistemas físicos, biológicos y químicos.

Esta diversidad de posibles sistemas de cómputo no convencionales surge fundamentalmente en inspiración a ciertas propiedades emergentes y de auto-organización que se observan en determinados sistemas naturales complejos, las cuales se intentan describir y entender para posteriormente utilizarse y emularse computacionalmente. Estos sistemas



(a) Quipu: antiguo instrumento inca de registro y de comunicación, que consistía de una larga cuerda, de la cual colgaban 48 cuerdas secundarias y varias otras sujetas a las anteriores. Se sabe de su uso contable, de registro (censos, cosechas) y se investiga sobre su utilidad como sistema de representación lingüística y de memoria (historia, canciones y poemas).



(b) Máquina analítica de Babbage-Lovelace: primera computadora mecánica digital de carácter general, controlada a partir de programación y programable. El dispositivo consistía de cuatro componentes: la rueda (análoga a la unidad de cálculo en las computadoras actuales), el almacenamiento (análogo a la memoria actual), el lector y la impresora (análogos a las entradas y salidas actuales).

**Figura 2.2:** Sistemas de computación históricos en substratos no convencionales.

de cómputo se pueden clasificar básicamente en [109]:

- Modelos computacionales inspirados en sistemas naturales tales como: la computación neuronal, la computación evolutiva, autómatas celulares, inteligencia en enjambres, sistemas inmunes artificiales, sistemas de vida artificial, computación en membranas y computación amorfa.
- Computación realizada a través de materiales naturales tales como: bioware, computación molecular o computación en sistemas cuánticos, en el caso de la computación cuántica.
- El estudio de procesos naturales que ocurren en la naturaleza tales como: procesos de auto-ensamblaje, procesos de desarrollo, procesos en enjambres, reacciones

bioquímicas, procesos cerebrales, en redes biológicas o en procesos celulares.

Por otro lado, desde un punto de vista histórico podemos observar cómo el modelo de Turing se desarrolló como un proceso inverso a lo que son las formas citadas anteriormente dentro de la computación no convencional, dónde el substrato o sistema físico es el punto de partida (se pueden encontrar referencias sobre cada de estas formas de computación en [110]). Como ya hemos mencionado, inicialmente la teoría computacional clásica se desarrolló antes que la mayoría de las implementaciones y aplicaciones de hardware. De cierta manera las implementaciones físicas fueron “coaccionadas” para seguir lo que dictaba y demandaba la teoría de Turing, en vez de que la teoría se supeditara a lo que el substrato físico, i.e. el hardware compuesto de transistores, pudiera computar de manera natural. Según Susan Stepney, una de las investigadoras más importantes dentro de la filosofía de la computación no estándar [111], las aplicaciones del cómputo convencional son doblemente restringidas: primeramente por partir de un modelo teórico y después por la implementación física de carácter no natural de dicho modelo, ya que los transistores en los que se fundamenta la computación clásica en su estado natural (aunque algo tan ingenierizado como un transistor se pueda considerar que posee un estado natural) son amplificadores análogos de corriente que se fuerzan a operar como interruptores digitales cuando se llevan a un estado de saturación.

Como ya hemos empezado a ver, la computación no convencional no obstante parece tomar una dirección diferente, ya que en este caso es el mundo natural real el origen de la inspiración para la construcción de nuevos sistemas y dispositivos de hardware y de wetware. Resumidamente, mientras que la computación clásica se caracteriza por un enfoque primario en la teoría (matemáticas), la computación no convencional apuesta por partir del hardware (física) [112]. De esta manera mediante la observación de las propiedades físicas del sistema biológico que nosotros exploraremos como posible sistema de computación no convencional extraeremos modelos teóricos de cómputo orientados a la implementación de aplicaciones sonoras.

## 2.2. Génesis Clásica y Futuros No Convencionales en Computación Musical

Con respecto a los dominios musicales los grandes avances referentes a la potencia de cómputo, siguiendo el desarrollo de la ley de Moore<sup>III</sup>, y orientados a la manipulación de medios digitales, han influenciado en gran medida la manera en que se genera la música hecha con computador en la actualidad. Históricamente se puede observar cómo los avances en las tecnologías de cómputo han evolucionado paralelamente a los avances dentro del campo de la tecnología musical. Así como ejemplo podemos citar los softwares actuales tipo *Digital Audio WorkStations* (DAW) y *Virtual Synthetizers* (VST) para generar música, o bien la gran diversidad de plataformas para reproducir y distribuir música por internet.

Los orígenes de la primera computadora musical se remontan al año 1950 en Australia, donde la computadora CSIR Mk1 2.7, una de las primeras cinco computadoras con almacenamiento de datos en el mundo, fue programada para reproducir en un altavoz varias melodías, en vez de usarse para su propósito original como indicador sonoro de que cierto programa había terminado de ejecutarse [114].

A partir de este punto de unión, el tándem entre computación y tecnología musical continúa entrelazándose hasta la actualidad y es probable que en el futuro los nuevos desarrollos dentro de las ciencias de la computación sigan generando cambios dentro del mundo de la tecnología musical.

Por otro lado también se puede observar cómo tradicionalmente el campo de la música hecha con computador se ha caracterizado por experimentar con nuevos formalismos matemáticos y tecnologías emergentes. En alusión a este hecho basta con nombrar a dos figuras históricas clave como John Chowning, desde el campo de la electrónica análoga, inventor de la síntesis FM, y Iannis Xenakis, desde el campo de la electrónica digital,

---

<sup>III</sup>La ley de Moore expresa que aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un microprocesador [113]. Se puede consultar una investigación muy interesante alrededor de los límites espaciales, informacionales y energéticos de la computación en [106].



**Figura 2.3:** CSIR Mk1, primer computador orientado a generar musica. Como almacenamiento de datos principal utilizaba líneas de retardo acústico de mercurio, con una capacidad típica de 768 palabras de 20 bit. Su reloj de memoria corría a 1000 Hz, con la unidad de control sincronizada a ese reloj y tomando dos ciclos para ejecutar una instrucción. El bus transfería un bit cada vez en cada instrucción.

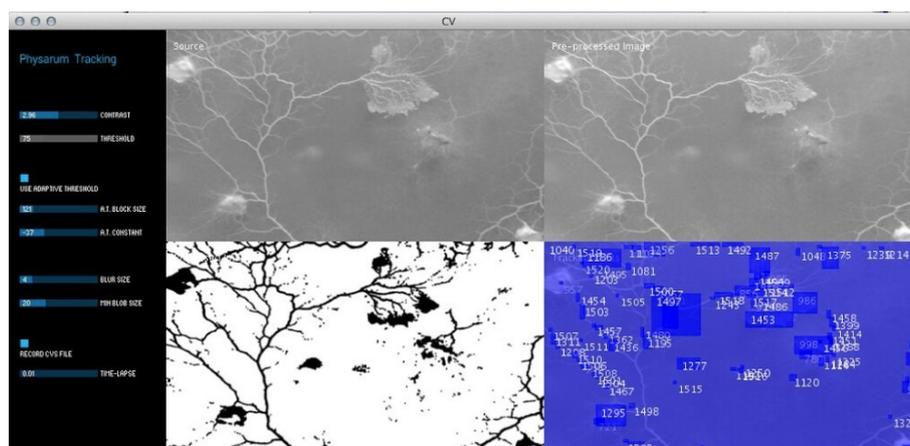
pionero del uso de la computadora en la composición musical algorítmica.

Partiendo de este tipo de exploraciones, comúnmente de carácter interdisciplinario, en la actualidad hay todo un campo enfocado a la investigación de nuevas interfaces para la expresividad musical que reúne tanto a músicos, tecnólogos o investigadores en torno a la creación y desarrollo de nuevas formas y dispositivos musicales [115]. Finalmente sólo mencionaremos otro ejemplo de tecnología computacional en auge dentro del campo la tecnología musical como es el uso de modelos y algoritmos de *machine learning*. Éstos surgen dentro del campo de las ciencias de la computación y hoy en día se aplican, por ejemplo, a la generación de sistemas musicales algorítmicos, tal como hemos visto en el ejemplo del final del capítulo introductorio 1.

Dentro de esta caracter de experimentación, juego e indagación en torno al uso de nuevas tecnologías hay algunos artistas e investigadores dentro del campo de la música hecha con computador y de los ámbitos DIY y DIWO<sup>IV</sup> que han empezado a utilizar ciertos sistemas pertenecientes a los cómputos no convencionales para la creación musical.

<sup>IV</sup>Paradigma contemporáneo de metodologías de trabajo *Do It Yourself, Do It With Others*.

Por ejemplo Miranda et al.[116] o el colectivo Interspecifics<sup>v</sup>, por mencionar algunos casos, han empezado a trabajar con sistemas capaces de generar gestualidades audiovisuales, síntesis de sonido y secuenciadores musicales a través de sistemas inspirados en cómputos no convencionales tales como bacterias, redes neuronales o mohos mucilaginosos (ver figura 2.4).



**Figura 2.4:** Interfaz gráfica del sistema Phychip de sonificación de patrones de crecimiento del moho mucilaginoso *Physarum Policephalum* desarrollado por Interspecifics.

Solamente citaremos en este punto que paralelamente al desarrollo de implementaciones físicas en substratos biológicos enfocadas a la creación de sistemas musicales existen modelos algorítmicos de síntesis y composición sonora inspirados en sistemas biológicos. Toca volver a citar en este punto a Xenakis, precursor en el uso de modelos de autómatas celulares para la composición algorítmica. Hoy en día existen conferencias como evoMUSART [117] (*“International Conference on Computational Intelligence in Music, Sound, Art and Design”*) enfocadas a la aplicación de sistemas de computación evolutiva, vida artificial, *machine learning* o inteligencia de enjambres para la generación, interpretación y análisis dentro de los campos de las artes, música, arquitectura o diseño.

Recapitulando, dentro de esta línea de experimentación con substratos no convencionales para la computación musical, vamos a mostrar en los siguientes apartados el desarrollo conceptual de un sistema musical construido a partir de cómputos no convencionales en

<sup>v</sup><http://interspecifics.cc>

substratos de bacterias. Para ello vamos a hacer primero un repaso del campo de estudio de la biocomputación y de la bactocomputación para entender algunos conceptos clave que nos servirán más adelante para el desarrollo de nuestro sistema.

### 2.3. BioComputación y BactoComputación

Para adentrarnos en esta sección primeramente mencionaremos que la relación que existe entre los dominios computacionales y los biológicos no es nueva. De hecho se puede trazar anecdóticamente hasta el siglo 17 cuando Descartes declaró ante la Reina Cristina de Suecia que los animales podían ser considerados una clase de máquinas. Ésta retó a Descartes a demostrar cómo un reloj se podía reproducir. Von Neumann tres siglos después, quien consideraba que la vida estaba fundamentada en procesos lógicos simples, en su publicación "*The General and Logical Theory of Automata*" demostró cómo una máquina era capaz de construir una copia de si misma [118]. Escribe von Neumann:

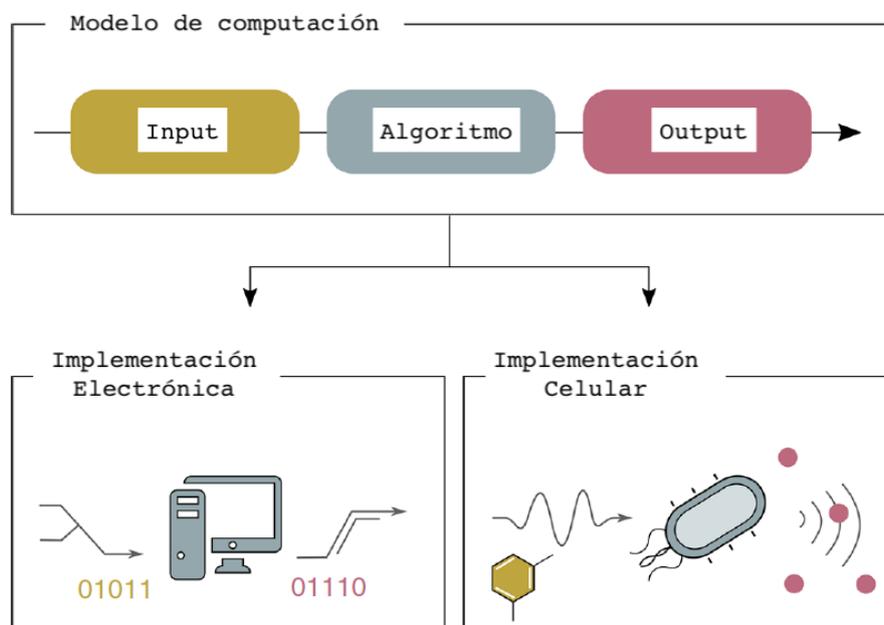
"Natural organisms are, as a rule, much more complicated and subtle, and therefore much less well understood in detail, than are artificial automata. Nevertheless, some regularities which we observe in the organisation of the former may be quite instructive in our thinking and planning of the latter"

En general ciertos procesos complejos biológicos pueden ser descritos en términos de redes de componentes computacionales, como por ejemplo a partir de compuertas lógicas Booleanas. La interacción de las moléculas biológicas junto con el flujo de información que controla el desarrollo y el comportamiento en los organismos vivos puede encajar en la descripción anterior en forma de red o de un modelo tipo "máquina" .

Por ejemplo François Jacob y Jacques Monod, pioneros de la microbiología anterior al descubrimiento del DNA, en el capítulo titulado "*Microscopic Cybernetics*" de su libro "*On Chance and Necessity*" [119] identificaron ciertos procesos biológicos que se pueden entender de acuerdo a principios lógicos:

“The logic of biological regulatory systems abides not by Hegelian laws but, like the workings of computers, by the propositional algebra of George Boole.”

No obstante la biocomputación más allá de utilizar esta analogía de red como una técnica conveniente para clarificar y entender el comportamiento de dichos sistemas complejos biológicos, trata de aprovechar ciertas propiedades inherentes a estos sistemas para realizar tareas computacionales definidas por humanos de una manera no convencional [120].



**Figura 2.5:** Modelo teórico de computación análogo tanto en computadores como en bacterias. Ambos reciben un conjunto de inputs que el algoritmo procesa y finalmente transforma en salidas. Mientras que en los sistemas de cómputo los inputs/outputs son señales electrónicas, en bacterias pueden ser señales químicas, físicas y biológicas diferentes [121].

La biocomputación, entendida como la aplicación de materiales y procesos biológicos orientados a la computación, ha sido investigada por varias décadas hasta la actualidad

<sup>vi</sup>. Estos materiales incluyen generalmente el DNA, RNA y proteínas, mientras que los

<sup>vi</sup>Uno de los trabajos seminales en biocomputación fue descrito en 1994 por Leonard Adleman, quien mostró cómo resolver el problema combinatorio de los caminos hamiltonianos a través del uso de DNA [122].

procesos abordan la transcripción, la traducción y la transducción y regulación de señales bioquímicas entre células o bacterias. En cierta manera la biocomputación, o bactocomputación, si consideramos estrictamente a bacterias, es un subdominio de la biología sintética y ésta es una disciplina científica emergente que trata de ingenierizar ciertos sistemas biológicos con varias finalidades como [123]:

- entender mejor las operaciones fundamentales de los sistemas biológicos.
- extender la química sintética y crear sistemas mejorados de síntesis de moléculas.
- investigar la optimización de ciertos sistemas biológicos para finalidades humanas.
- desarrollar y aplicar principios de ingeniería para el diseño y la construcción de sistemas biológicos.

El campo de estudio de la biología sintética tiene aplicaciones de alto impacto en campos tan diversos tales como en la salud en estudios clínicos sobre antibióticos [124], en temas de energía alrededor de los biocombustibles [125] o en temas de biotecnología ambiental [126]. A través de la ingeniería en bacterias, y a veces en otro tipo de células, se ha conseguido crear sistemas sintéticos capaces por ejemplo de emular películas sensibles a la luz [127] o capaces de generar formaciones de patrones sencillos [128],[129].

En el dispositivo de bactocomputación que proponemos utilizar vamos a trabajar con un sistema biológico sintético capaz de sostener una formación de oscilaciones sincronizadas en el tiempo basado en una construcción conocida como *represilador*. Aún así, antes de empezar a describirlo haremos primero una breve introducción a ciertos conceptos importantes dentro de la biología sintética (siguiendo el texto [130]) que nos servirán como fundamento conceptual para proseguir en este desarrollo.

### 2.3.1. Información Genética

La biología sintética se basa fundamentalmente en los descubrimientos del ADN como transportador de información genética y en lo que se conoce como el “dogma central” de

la biología molecular [131]. En éste el ADN produce primeramente RNA, el cual después produce proteínas. Los bloques fundamentales de la información genética se conocen como genes y cada gen codifica para una proteína en particular. Finalmente estos genes pueden estar encendidos (expresados) o bien apagados (reprimidos) cuando se requiere.

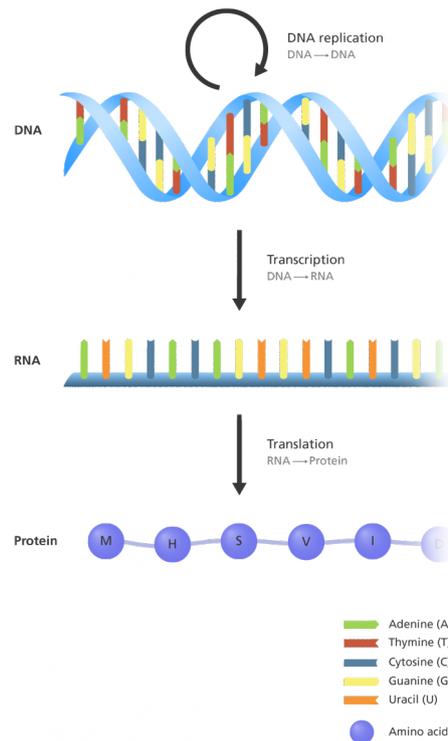
Para que una secuencia de ADN se pueda convertir en una proteína, primero el ADN se tiene que leer (proceso de transcripción) y después tiene que suceder que esta parte transcrita sea convertida (proceso de traducción) en una proteína. La transcripción de un gen produce una copia de RNA mensajero (mRNA), la cual finalmente se puede traducir en una proteína.

Durante la transcripción la copia de mRNA se sintetiza a través de una enzima conocida como RNA polimerasa, la cual tiene que ser capaz de reconocer la región específica a ser transcrita. La transcripción empieza en sitios determinados dentro de la región de DNA, los cuales se conocen como regiones promotoras. Estos promotores son como indicadores o señales y no se transcriben a RNA. Las regiones que sí son transcritas a RNA y eventualmente llegan a ser proteínas se conocen como genes estructurales. La transcripción después finaliza al llegar a una región marcada por un terminador, el cual, al igual que el promotor no se transcribe.

Todo este proceso sistemático, que parte de la información guardada en el DNA y después sigue en mRNA mensajero y termina en la síntesis de una proteína, se cataliza aparte por otro tipo de moléculas. Éstas pueden ser enzimas o otro tipo de factores como por ejemplo azúcares. Dentro de la regulación genética se forma un *loop* donde el producto de un gen se requiere posteriormente para producir otros genes, y éstos correspondientemente influyen la expresión genética propia. Esta investigación sobre el mecanismo en los procesos de regulación genética durante la síntesis de proteínas fue descrita primeramente en 1961 por Jacob y Monod [132], y con ella ganaron el Nobel de medicina en el año 1965.

Generalmente los genes están compuestos de diferentes regiones, las cuales controlan y codifican el tipo de proteína que se va a sintetizar. Estas regiones normalmente tienen la forma específica de promotor - gen - terminador. La transcripción se puede regular a

través de moléculas afectoras, las cuales se conocen como inductores o represores. Éstas interactúan con el promotor de tal manera que incrementan o hacen decrecer el nivel de transcripción. Estos inductores o represores sirven finalmente dentro de la biología sintética para controlar la expresión de ciertas proteínas.

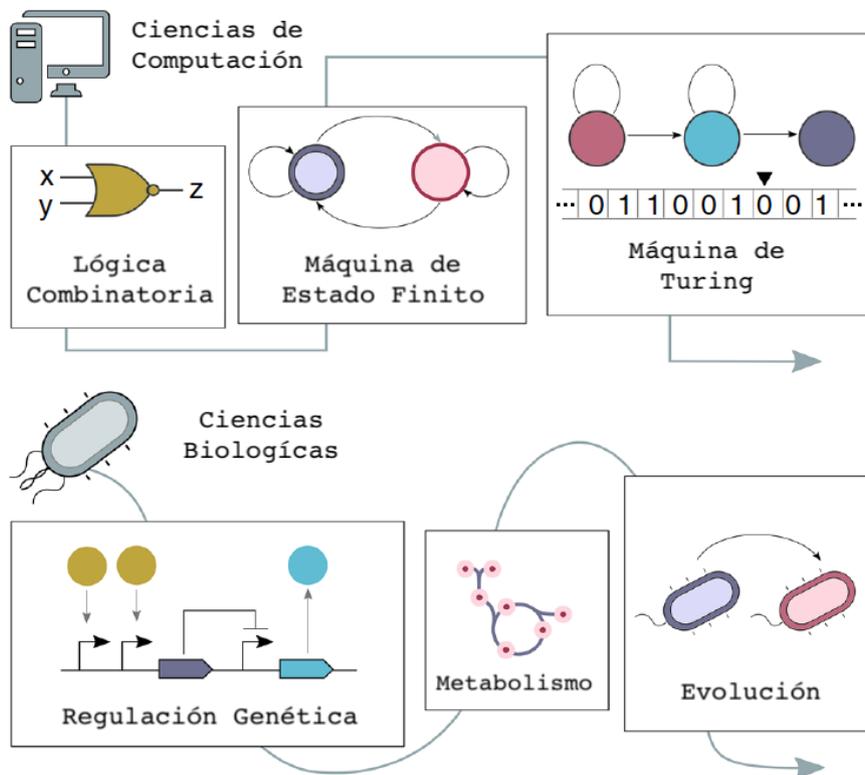


**Figura 2.6:** El “dogma central” es el proceso a través del cual las instrucciones en el ADN se convierten en un producto funcional. Fue inicialmente propuesto en 1985 por Francis Crick, quien descubrió la estructura del ADN gracias a la investigación de Rosalind Franklin [133].

De esta manera gran parte de los desarrollos que han ocurrido dentro de la biología sintética tienen que ver con la construcción de circuitos (constructos o construcciones genéticas) hechas de partes biológicas, como genes y proteínas. Las anteriores reciben algún tipo de entrada, ya sea endógena o exógena, para realizar alguna transformación y producir finalmente un resultado, o salida, determinada por las reglas codificadas en el circuito.

Finalmente utilizando este tipo de esquema de *input* - transformación - *output*, análo-

go en cierta manera al de la computación convencional, los sistemas de bactocomputación dentro de la biología sintética se engloban dentro de un modelo fundamentalmente inspirado en circuitos lógicos [121]. Dos de los ejemplos más relevantes que han surgido mediante este esquema son, por una parte el *switch* genético [134] y por otra el *represilador* genético [135]. En la próxima subsección elaboraremos una explicación de éste último ya que es precisamente la construcción genética en la que se basa nuestro sistema de bactocomputación sonora.



**Figura 2.7:** Las células permiten ir más allá de los sistemas basados en circuitos lógicos, ya que los sistemas vivos se han desarrollado evolutivamente mediante procesos computacionales dispuestos a permitir a las células el procesamiento de información. El dogma central de la biología molecular se enfoca de una manera similar al modelo de células como circuitos lógicos ya que éste no incorpora mecanismos metabólicos o evolutivos.[121].

### 2.3.2. Osciladores Biológicos Sintéticos

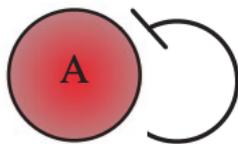
Dentro del campo de la física un oscilador es de manera genérica un sistema que produce una salida regular y periódica, y el ejemplo más básico parte de lo que se conoce como oscilador armónico. Citamos el gran clásico “The Feynman Lectures on Physics”[136] ya que en éste se menciona, entre otros tantos osciladores, el ejemplo de osciladores en el crecimiento en colonias de bacterias:

“The harmonic oscillator, which we are about to study, has close analogs in many other fields; although we start with a mechanical example of a weight on a spring, or a pendulum with a small swing, or certain other mechanical devices, we are really studying a certain differential equation. This equation appears again and again in physics and in other sciences, and in fact it is a part of so many phenomena that its close study is well worth our while. Some of the phenomena involving this equation are the oscillations of a mass on a spring; the oscillations of charge flowing back and forth in an electrical circuit; the vibrations of a tuning fork which is generating sound waves; the analogous vibrations of the electrons in an atom, which generate light waves; the equations for the operation of a servosystem, such as a thermostat trying to adjust a temperature; complicated interactions in chemical reactions; the growth of a colony of bacteria in interaction with the food supply and the poisons the bacteria produce; foxes eating rabbits eating grass, and so on; all these phenomena follow equations which are very similar to one another, and this is the reason why we study the mechanical oscillator in such detail. ”

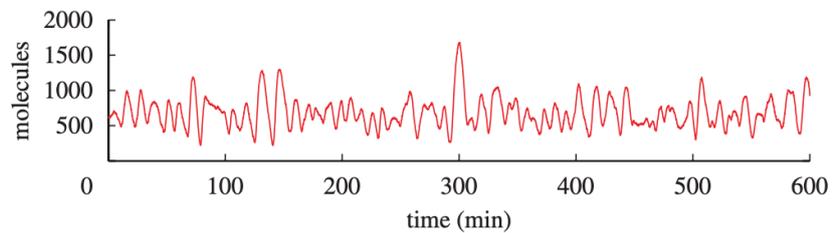
En el caso particular en el que se unen o se acoplan varios de estos osciladores entre sí, sucede que bajo ciertas condiciones se empiezan a sincronizar, como por ejemplo en el caso de las células del corazón, las cuales se activan al unísono, o en el caso de enjambres de luciérnagas encendiéndose y apagándose colectivamente [137].

Uno de los primeros artículos en los que se investiga el carácter oscilatorio a nivel celular

es "Oscillatory behavior in enzymatic control processes" [138] de Goodwin del año 1965 y previo a éste, en su libro "Temporal organization in cells"[139] del 1963. En el artículo se detalla el fenómeno de inhibición y represión a través de *loops* de retroalimentación en genes y se desarrolla un modelo de ecuaciones diferenciales, el cual hoy en día se conoce como oscilador de Goodwin (ver figura 2.8).



(a) Topología del oscilador de Goodwin. Comprende un simple gen que se reprime a si mismo.



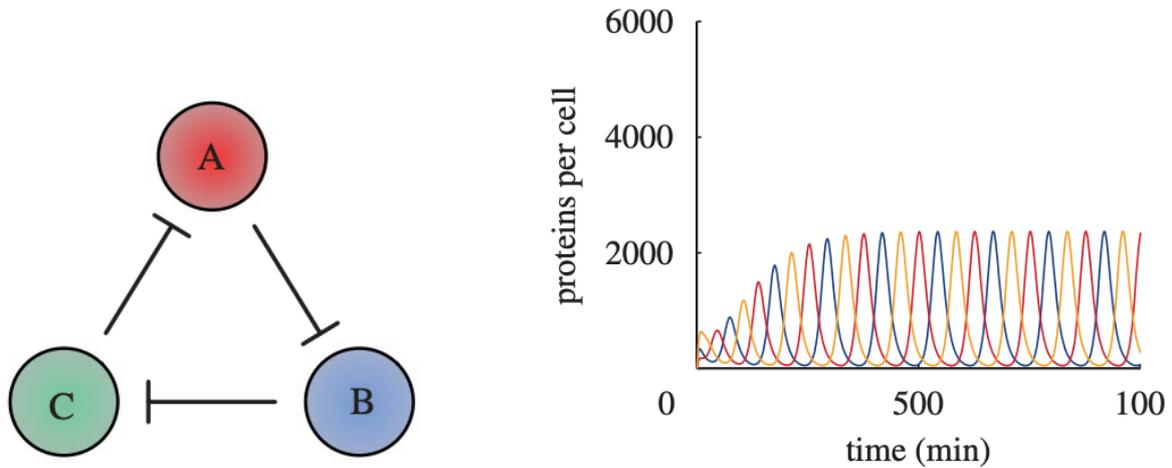
(b) Simulación de Gillespie del modelo de oscilador de Goodwin [140].

**Figura 2.8:** Topología y modelo del Oscilador de Goodwin [141]

Otro de los primeros artículos que se aproxima al estudio de osciladores en redes de regulación genética, y ya no en simples genes como en el caso de Goodwin, es el artículo de Leibler y Barkai titulado "Circadian clocks limited by noise" [142]. En éste se muestra un modelo simple de una red bioquímica que puede oscilar de manera robusta en presencia de ruido externo. En el estudio argumentan cómo estas oscilaciones, las cuales por ejemplo pueden modular los ritmos circadianos que de alguna manera controlan cuándo estamos dormidos o despiertos, se basan en redes de regulación genética.

Leibler más adelante junto a Elowitz mostraron en otro de artículo, de carácter más experimental que el anterior, una construcción práctica de un oscilador genético artificial utilizando una red sintética de represores, para la cual acuñaron el término *repressilador* [143]. Esta construcción básicamente tiene la forma de un anillo circular de genes en los cuales cada uno de éstos reprime a su sucesor (A reprime B reprime C reprime A) (ver

figura 2.9)( para conocer más acerca del *repressilador* se puede consultar [144]).



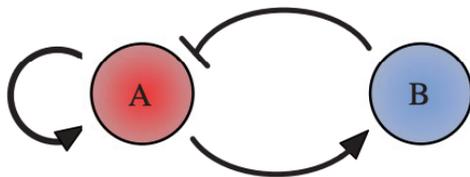
**Figura 2.9:** Topología y modelo del Represilador [141]

Recientemente otras investigaciones en esta dirección han logrado acoplar sistemas de relojes genéticos para producir oscilaciones sincronizadas a nivel de poblaciones y ya no simplemente en bacterias individuales[145]. Éste, el cual se conoce como sistema de relojes genéticos sincronizados, basándose en trabajos teóricos previos [135][146], básicamente demuestra la posibilidad de “ingenierizar” poblaciones de bacterias para producir oscilaciones a nivel global de colonia. Esta última construcción sintética es la que vamos a utilizar como base de nuestro sistema de bactocomputación sonora, y por lo tanto vamos a detallarla en el siguiente apartado.

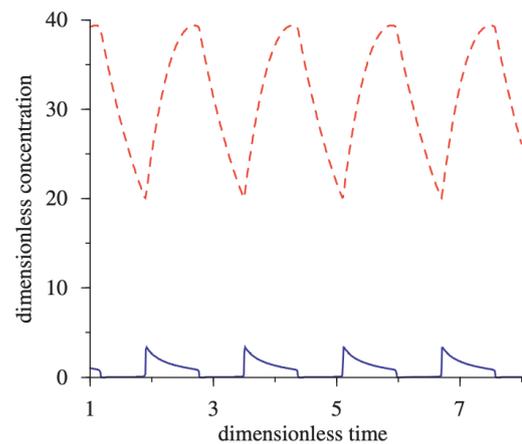
### 2.3.3. Quorum Sincronizado de Relojes Genéticos

Más allá de la implementación biológica específica del sistema de quorum sincronizado de relojes genéticos, también llamado oscilador de Danino[145], esta construcción utiliza fundamentalmente la topología abstracta de un oscilador con retroalimentación negativa amplificada. Esta arquitectura consiste en un sistema de dos componentes, donde un gen activador (A) activa su propio gen represor (B) (ver figura 2.10). En esta construcción

existe una fase latente donde la concentración tanto del activador como del represor se acumulan permitiendo generar amplitudes de señal grandes. La ventaja del oscilador de Danino con respecto a la del oscilador con retroalimentación negativa amplificada es que el primero utiliza una pequeña molécula (AHL), asociada con el fenómeno de *quorum sensing*<sup>VII</sup> en bacterias, acoplada a un complejo constitutivo expresado en el activador. Esta molécula de *quorum sensing* se puede difundir a través de la membrana en varias células donde puede formar un complejo junto al activador intracelular para activar la transcripción dentro de la célula. Este mecanismo proporciona la posibilidad de comunicación entre células, lo que finalmente permite la sincronización de oscilaciones en el tiempo en poblaciones de estos microorganismos.



(a) Topología de un oscilador con retroalimentación negativa amplificada.



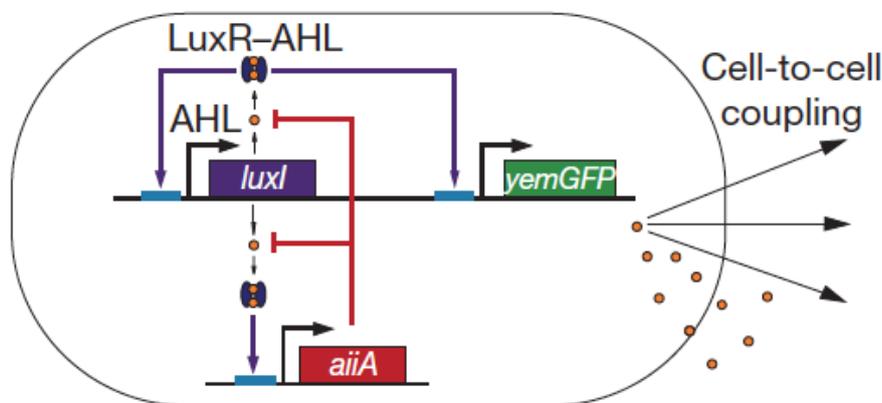
(b) Simulación de un oscilador con feedback negativo amplificado.

**Figura 2.10:** Topología y modelo de un oscilador con feedback negativo amplificado en el cual se basa el oscilador de Danino [141]

Más en detalle el diseño del oscilador sincronizado de Danino está basado en las maquinarias de *quorum sensing* de las bacterias *Vibrio Fischeri* y de *Bacillus Thuringiensis*. En la construcción se posicionan los genes luxI (de *V. Fischeri*), aiiA (de *B. Thuringen-*

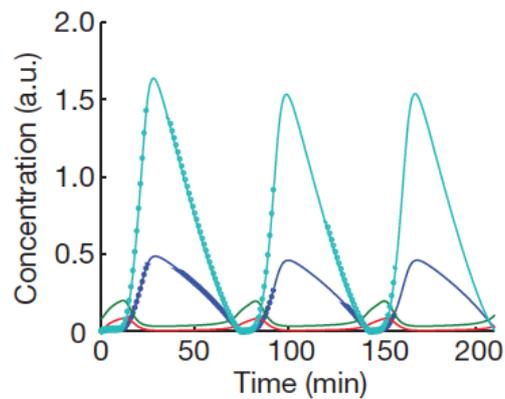
<sup>VII</sup>La percepción de cuórum o autoinducción (en inglés, quorum sensing) es un mecanismo de regulación de la expresión genética en respuesta a la densidad de población celular. Las células involucradas producen y excretan sustancias, llamadas autoinductores, que sirven de señal química para inducir la expresión genética colectiva.

*sis*) y *yemGFP* bajo el control de tres copias idénticas del promotor *luxR*. *LuxI* produce acyl-homoserin lactona (AHL), una pequeña molécula que puede difundirse a través de la membrana celular y que medía el acoplamiento intracelular. La AHL se une intracelularmente a *luxR* y a la vez el complejo *luxR*-AHL funciona como activador del promotor *luxI*. Por otro lado *AiiA* regula negativamente al promotor a través de la degradación de AHL. (Ver figura 2.11).



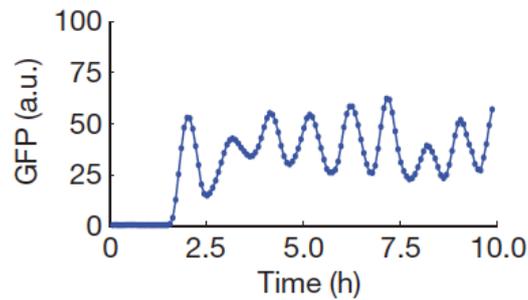
**Figura 2.11:** Diagrama de red. El promotor *luxI* genera la producción de los genes *luxI*, *aiiA* y de *yemGFP* en tres módulos transcripcionales idénticos. *LuxI* produce enzimáticamente una pequeña molécula de AHL, la cual se difunde fuera de la membrana de la célula y en las células vecinas, activando el promotor *luxI*. *AiiA* regula negativamente el circuito funcionando como una proteasa para AHL.[145]

Las oscilaciones en el oscilador de Danino se pueden dividir en la dinámica de tres partes: el aumento de AHL, la degradación de AHL y el resto de las fases (*LuxI*, *AiiA*) (Ver figura 2.12). Estas fases se pueden observar en la figura 2.12. Durante la fase de aumento las moléculas de AHL se acumulan en el sistema y en el momento en que la concentración de AHL llega a un cierto nivel se genera un crecimiento en las concentraciones tanto de *LuxI* como de *AiiA*. En este momento la alta concentración de *AiiA* empieza a degradar las moléculas acumuladas de AHL. Una vez que los niveles de AHL han decrecido hacia un estado de reposo, las concentraciones de *LuxI* y de *AiiA* empiezan a decrecer, debido a una degradación enzimática. A partir de aquí el ciclo se inicia otra vez en la fase de aumento de AHL y así evoluciona cíclicamente de manera oscilatoria.

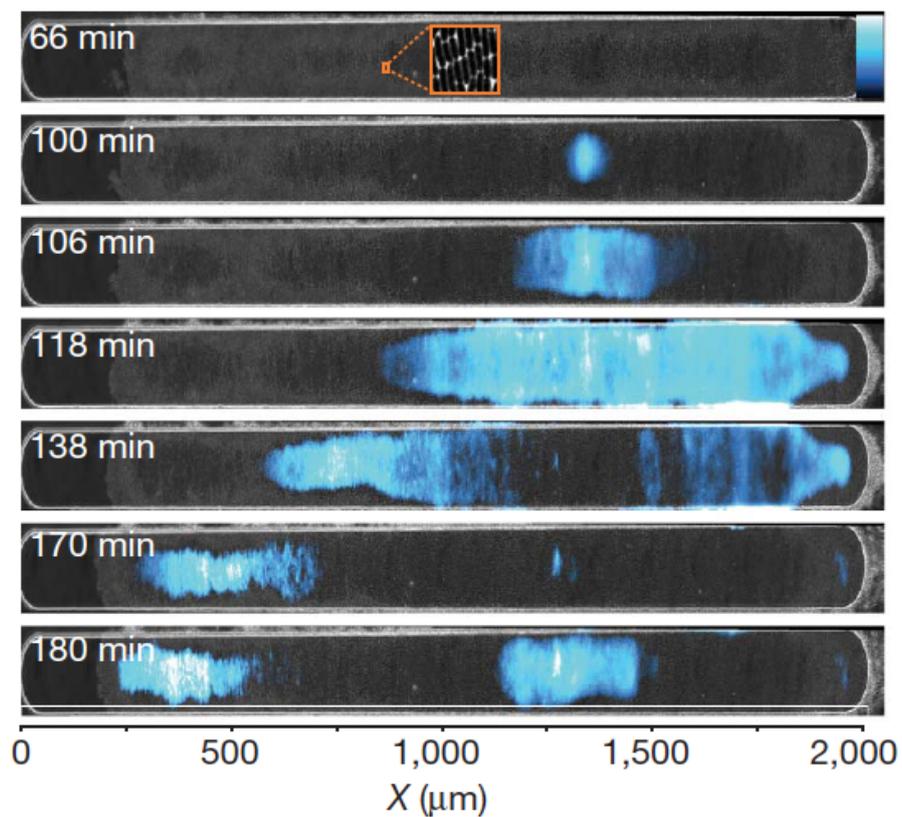


**Figura 2.12:** Una serie de tiempo típica para las concentraciones de LuxI (cyan), AiiA (azul), AHL interna (verde), AHL externa (rojo). LuxI y AiiA se siguen uno al otro y están en anti-fase con las concentraciones de AHL externas e internas. [145]

El sistema de *quorum sensing* descrito requiere de una densidad crítica de células para generar un comportamiento coordinado. Esto significa que cuando la concentración de AHL llega a un determinado valor entonces se activa en el sistema la transcripción de los genes de la bacteria asociados a una forma de acción colectiva. En este caso podemos observar esta acción coordinada debido a que una de las 3 copias de LuxR (a parte de las otras que sintetizan por un lado AHL a través de LuxI y controlan la producción de AiiA por otro) sintetiza una proteína fluorescente, llamada yemGFP, la cual se utiliza como reportera y nos permite observar el comportamiento sincronizado como pulsos de fluorescencia coordinados, tal como podemos ver en la figura 2.13.



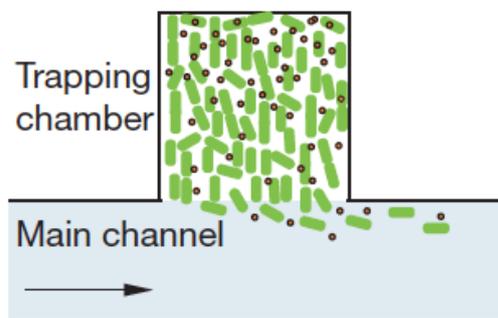
(a) Alrededor de los 90 min las células empiezan a oscilar sincronizadamente después de alcanzar una densidad crítica dentro de la trampa de microfluídica.



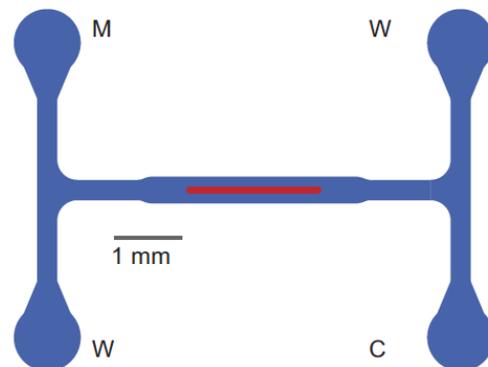
(b) Las ondas viajeras emergen espontáneamente en la mitad de la colonia y se empiezan a propagar hacia los extremos a una velocidad de  $8\text{-}35 \mu\text{m min}^{-1}$ . Pasado un cierto tiempo se observa como las ondas empiezan a perder coherencia.

**Figura 2.13:** Oscilaciones de GFP en el tiempo en el sistema [145].

Experimentalmente el sistema de bacterias está emplazado en un dispositivo de microfluídica. Éste consiste en un canal, por donde se mandan los nutrientes, que va a parar a una trampa de forma rectangular donde habitan las bacterias, tal como vemos en la figura 2.14. Por un lado este sistema permite mantener un flujo de nutrientes constante hacia las bacterias, de manera que estas pueden crecer exponencialmente dentro de la trampa, y por otro lado permite controlar la densidad de células y la degradación de la AHL en el medio. Primeramente la densidad de células influencia en la posibilidad de que se genere la AHL suficiente para que el sistema de transcripción empiece a operar, así experimentalmente se observa que para densidades bajas no existen oscilaciones. Por otro lado la AHL que media el *quorum sensing* a parte de difundirse intracelularmente también se difunde y sale fuera de la trampa, así de esta manera variando el flujo del canal de microfluídica se puede regular la degradación de la AHL en el sistema, y esto finalmente permite modificar a la vez la frecuencia y la amplitud de oscilación de las ondas de fluorescencia.



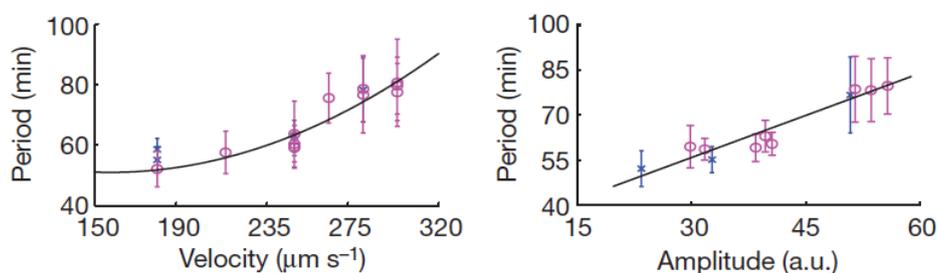
(a) Dispositivo de microfluídica utilizado para mantener las colonias de E.Coli a una densidad constante. El canal principal suministra medio a la células dentro de la trampa y el flujo se controla externamente para manipular la degradación de AHL.



(b) Dispositivo de microfluídica completo donde (M) es el punto de inyección de medio, (W) es el “waste” o donde van a parar los residuos y (C) por donde se inyectan las células.

**Figura 2.14:** Dispositivos de microfluídica para los experimentos de ondas sincronizadas de bacterias [145].

En la figura 2.15 se muestra como en el oscilador de Danino existe una relación lineal entre la amplitud de las oscilaciones y el período de tiempo en éstas. Esta relación es debida al hecho de que la frecuencia de las oscilaciones viene dictaminada por el tiempo que tardan en degradarse las concentraciones tanto de AiiA como de LuxI. Así de esta manera el hecho de que la amplitud sea proporcional al período de las oscilaciones es consistente con un sistema típico de “degradación y disparo”<sup>viii</sup> observado en otros osciladores intracelulares [147].



**Figura 2.15:** A la izquierda, período como función de la velocidad del flujo del canal, mostrando como se puede ajustar un periodo entre 55-90 min. Derecha, período contra amplitud par experimentos en diferentes tamaños de trampas (magenta 84-90  $\mu\text{mm}$ , azul 100  $\mu\text{mm}$ ) [145].

Resumiendo lo expuesto hasta ahora, a lo largo de esta sección hemos visto como a partir de una construcción sintética basada en un sistema de *quorum sensing* se pueden acoplar relojes genéticos para llegar a un estado oscilatorio sincronizado en un grupo de colonias de bacterias. En este sentido el uso de las propiedades rítmicas de la síntesis de las moléculas de AHL funciona como una especie de metrónomo, siguiendo la analogía con el fenómeno de sincronización en los péndulos de Huygens<sup>ix</sup>.

Este diseño permite, dentro del marco de la biotecnología, asentar las bases para el desarrollo e implementación futura de redes bacterianas que funcionen como sensores espa-

<sup>viii</sup>Término acuñado en el BioCircuits Institute en analogía a los modelos dinámicos de ‘integrate and fire’ comunes en neurociencias.

<sup>ix</sup>En febrero de 1665, el físico holandés Christiaan Huygens, inventor del reloj de péndulo, se tuvo que recluir en su cuarto a causa de una enfermedad. Un día mirando distraídamente un par de relojes que había construido hacía poco, y que estaban colgados uno junto al otro, se percató de algo muy curioso: los dos péndulos oscilaban con perfecta sincronía.

cialmente distribuidos, o bien como “máquinas sintéticas” para acoplar procesos dinámicos complejos entre poblaciones multicelulares en crecimiento [145].

Más allá de esto, dentro de la aplicación de esta construcción sintética a nuestro sistema híbrido de síntesis sonora vamos a enfatizar el hecho de que podemos manipular la amplitud y el período de salida del sistema, i.e. las unidades de fluorescencia de la molécula reportera de GFP y su tiempo de prendido y apagado, mediante la variación del flujo del canal de microfluídica, degradando en mayor o menor medida la concentración de AHL.

## 2.4. Síntesis Híbrida en Sistemas BactoElectrónicos

A lo largo de esta sección vamos a exponer varias estrategias orientadas a la transformación de la señales de salida del sistema de quorum sincronizado en bacterias hacia señales sonoras. Para ello implementaremos diferentes técnicas de transformación de los datos de fluorescencia obtenidos experimentalmente [145] para su aplicación tanto en metodologías de procesado digital de señal (DSP) como o en el desarrollo de prototipos híbridos bacteoelectrónicos (compuestos tanto de partes biológicas como electrónicas).

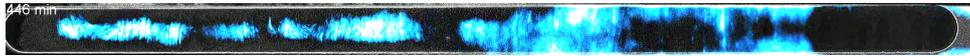
Antes de poder transformar los datos de fluorescencia a sonido tenemos que extraer la señal experimental de GFP que se observa en el dispositivo de microfluídica en cuestión. Para ello analizaremos primero los videos de [145] en el software de procesado de imágenes ImageJ [148]. Este proceso que se detalla a continuación se compone de los siguientes pasos:

1. Segmentación del vídeo en un *time-lapse* de fotogramas (*frames* individuales del vídeo) y conversión a escala de grises.
2. Análisis en la gráfica de superficie tridimensional de las intensidades de los píxeles (0 – 255). Extracción de datos a `.csv` (archivo de datos separados por comas).
3. Compresión de la intensidad de los píxeles del eje Y y cálculo del promedio de la

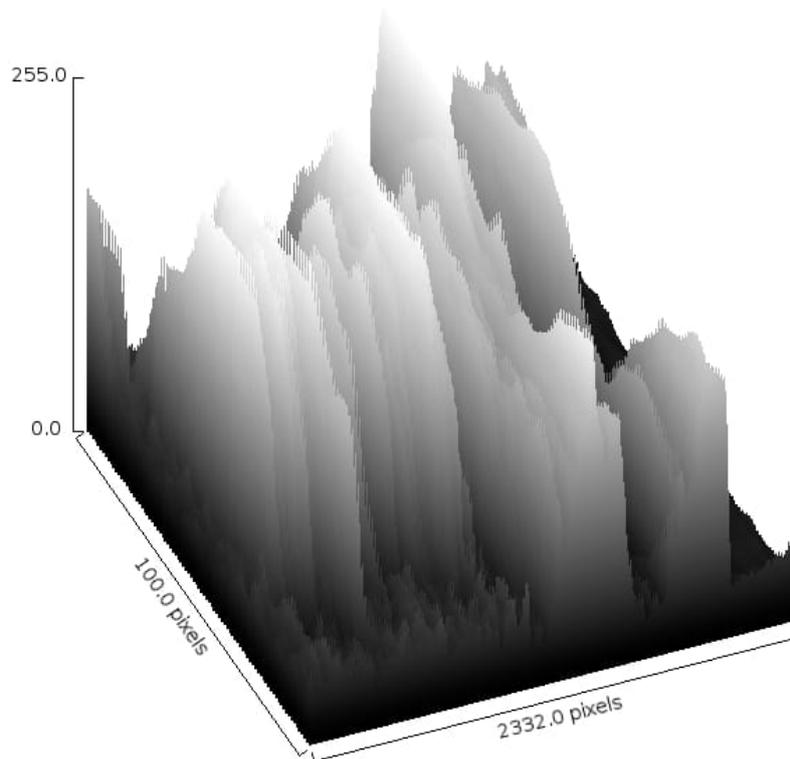
intensidad en el eje  $X$  para cada uno de las gráficas.

4. Cálculo final de la intensidad promedio de GFP en el tiempo. Extracción de datos a `.csv`.

En la figura 2.16 podemos observar un ejemplo de cómo se desarrollan los pasos anteriormente descritos. Como resultado final obtenemos la variación promedio de GFP en la trampa de microfluídica a lo largo del tiempo, tal como observamos en la figura 2.17. Estos datos obtenidos nos servirán para el desarrollo de las diferentes modalidades de transformación de las señales sonoras.

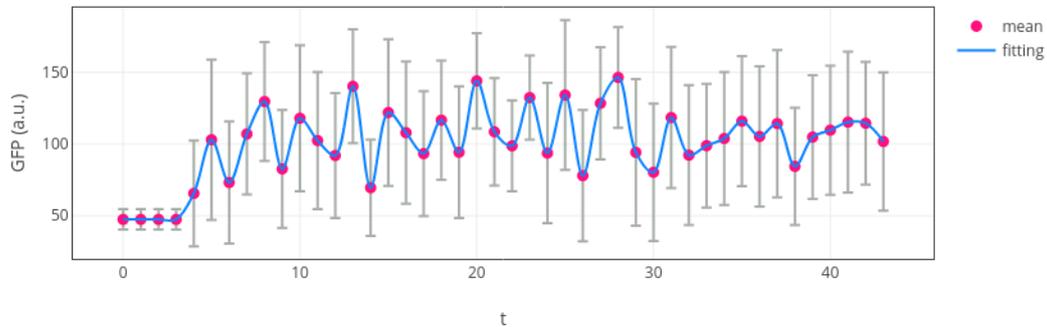


(a) Fotograma del dispositivo de microfluídica.



(b) Gráfica de superficie de las intensidades de fluorescencia en escala de grises del fotograma a través de ImageJ.

**Figura 2.16:** Transformación de la señal de fluorescencia a una gráfica de superficie con el índice de escala de grises de 0 a 255.



**Figura 2.17:** Resultado final de GFP, en unidades arbitrarias, a lo largo del tiempo, con su correspondiente desviación estándar. Tal como podemos observar la gráfica obtenida se corresponde con la gráfica de [145] que observamos en la figura 2.13.

### 2.4.1. Sonificación DSP

La sonificación mediante el procesado digital de señales que vamos a desarrollar en esta sección se enmarca dentro de la sonificación entendida, en su definición más estandarizada, como el uso de audio no verbal para transmitir información o bien para percibir datos [149]. Paralelamente, el concepto de sonificación se puede entender más ampliamente como la transformación de datos hacia los dominios sonoros. Esta transformación se puede realizar mediante diferentes estrategias, dentro las cuales destacamos la sonificación basada en parámetros, la cual desarrollamos a continuación [150].

La sonificación basada en parámetros indica cambios en un dimensión de datos representados en una dimensión acústica para producir una salida sonora [149]. En nuestro caso estas dimensiones de datos se representan a través de una variable de GFP que oscila a lo largo de una dimensión temporal de manera discreta.

El sonido, en su multiplicidad de dimensiones que lo representa, permite disponer de un espacio de múltiples posibilidades de mapeo entre los datos y el sonido. Por lo tanto para poder utilizar una sonificación basada en parámetros se deben reducir dimensiones o bien de los datos o de los parámetros sonoros en cuestión.

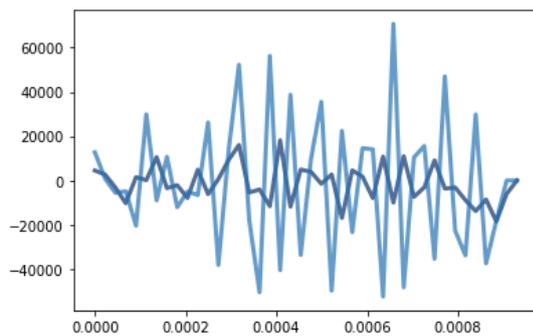
En nuestro caso la elección de los parámetros sonoros viene determinada por la analogía directa entre los parámetros de un oscilador bacteriano y un oscilador sonoro. Así, de esta manera, los parámetros de GFP que oscilan en el tiempo se utilizan para variar la frecuencia de un oscilador sonoro. La representación más básica de este último sistema, el cual se basa en un *voltage control oscillator* (VCO), i.e. un sistema que a partir de una variación de voltaje determina una frecuencia sonora de salida, es el que vamos a desarrollar en la siguiente sección. No obstante, como punto de partida, a continuación vamos a utilizar un sistema de síntesis sonora mediante DSP para emular el sistema VCO. Este sistema lo implementamos en Python, para ser consistentes a lo largo de la tesis. A continuación mostramos el código.

```
1 #importar librerias
2 from __future__ import print_function, division
3 import thinkdsp
4 import numpy as np
5 import pandas as pd
6
7 PI2 = 2 * np.pi
8 GRAY = '0.7'
9
10 np.set_printoptions(precision=3, suppress=True)
11 #importar csv
12 names = ['time', 'GFP']
13 df = pd.read_csv('/home/carlestapi/Documentos/dataGFP.csv', header=0,
14                 names=names)
15 df.head()
16
17 ys = df.GFP.values[:, -1]
18 time = df.time.values[:, -1]
19 #convoluci n
```

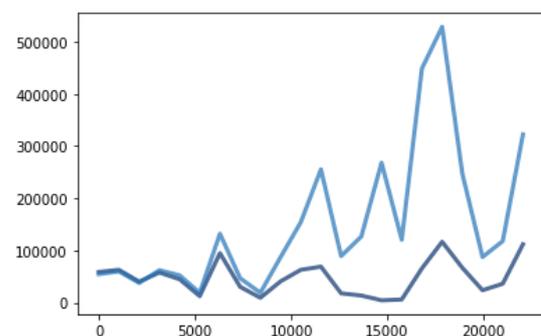
```

19 M = 3
20 window = np.ones(M)
21 window /= sum(window)
22 smoothed = np.convolve(ys, window, mode='valid')
23 smoothed_time = time[M//2: len(smoothed) + M//2]
24
25 gfpsound = thinkdsp.Wave(ys)
26 spectrum = gfpsound.make_spectrum()
27
28 diff = np.diff(ys)
29 change = thinkdsp.Wave(diff, framerate=44100)
30 change.make_audio()
31 change_spectrum = change.make_spectrum()
32
33 spectrum = change.make_spectrum()
34 spectrum.plot(color=GRAY)
35 spectrum2 = smooth.make_spectrum()
36 spectrum2.plot()

```



(a) Onda de audio de la sonificación DSP de los datos de fluorescencia normales y en azul más oscuro los mismos datos convolucionados.

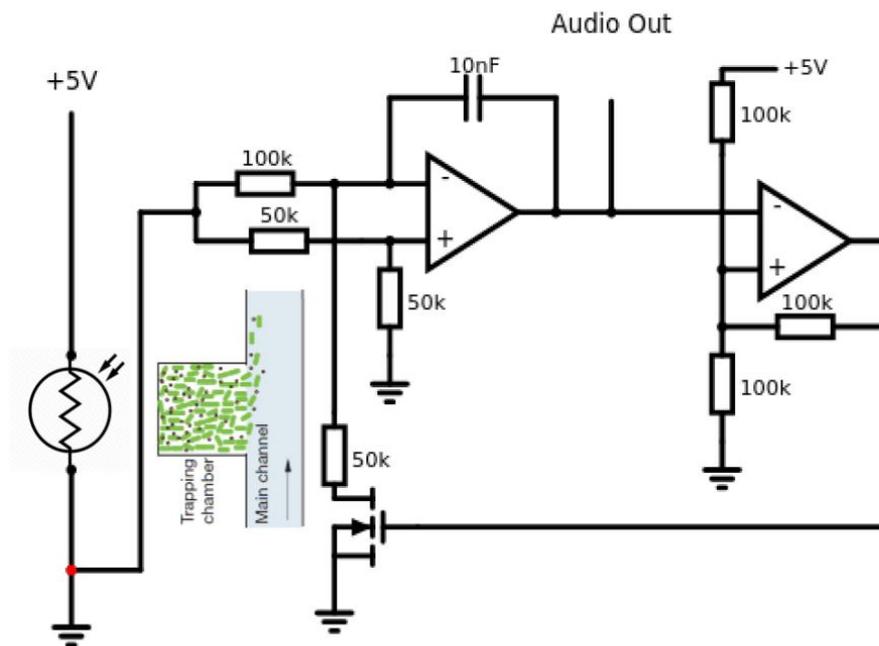


(b) Espectro de audio de la ondas de audio de la sonificación DSP con los datos normales y convolucionadas.

Figura 2.18

### 2.4.2. Sistema Básico de *Voltage Controlled BactoOscillator*

En esta sección se plantea el desarrollo de un oscilador bacteriano controlado por voltaje, el cual acuñamos como VCbO. Este oscilador tiene una frecuencia de salida determinada por el voltaje de control variable generado debido a la luminosidad de fluorescencia dentro de la trampa de microfluídica y transformado a una diferencia de voltaje mediante un fotorresistor. Este circuito conforma un sistema bactoelectrónico unidireccional entre el circuito genético con salida lumínica y el circuito electrónico, con un acoplamiento entre ambos mediado por el uso del fotorresistor. (Más adelante analizaremos la posibilidad de acoplar un circuito genético con una salida reportera de señalización eléctrica y no lumínica junto a un circuito electrónico en la sección 2.4.5).



**Figura 2.19:** Diagrama del Voltage Controlled BactoOscillator, donde se acoplan el módulo microfluídico, fotorresistivo y de VCO.

El circuito que se describe a continuación se plantea como un modelo de partida para un VCbO más complejo que desarrollaremos en la próxima sección 2.4.3. Este modelo se basa fundamentalmente en un VCO compuesto por dos amplificadores operacionales

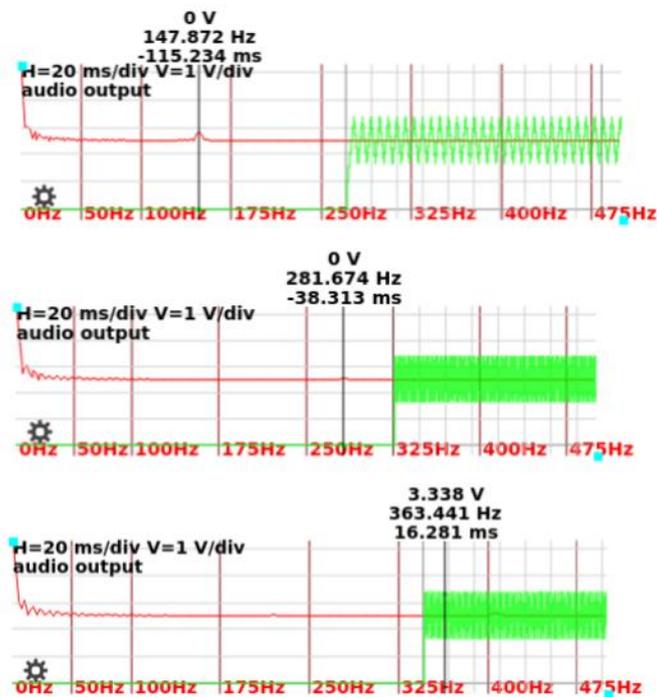
(op-amp) en cascada.

El primer op-amp del circuito opera como un integrador. En este caso un divisor de voltaje coloca el *input* (+) a la mitad del voltaje de control. El op-amp intenta después mantener el *input* (-) al mismo voltaje y esto requiere un flujo de corriente a través de la resistencia de  $100k\Omega$  para asegurar que la caída de voltaje sea la mitad del voltaje de control del circuito.

Cuando el MOSFET, en la parte de abajo del circuito está prendido, la corriente va desde la resistencia de  $100k\Omega$  al MOSFET. Ya que la resistencia de  $50k\Omega$  tiene la misma caída de voltaje que la de  $100k\Omega$  pero la mitad de resistencia, entonces debe tener el doble de corriente circulando a través del ella. La corriente adicional viene desde el capacitor en carga de tal manera que el primer op-amp tiene que suministrar un *output* de voltaje linealmente creciente como fuente de corriente.

Cuando el MOSFET de la parte inferior está apagado ,la corriente que viene de la resistencia de  $100k\Omega$  circula a través del capacitor descargándolo, necesitando una caída de voltaje estable desde el primer op-amp.

El segundo op-amp es un disparador de Schmitt, el cual toma la onda de corriente generada después del fotorresistor acoplado a la trampa de microfluídica. Reescalando el valor de este último, el op-amp emite un voltage de  $5V$  y genera un límite de voltage de  $1,67V$  cuando el voltaje de control de entrada sube por encima de  $3,3V$ . Cuando el voltaje cae por debajo de  $3,3V$  entonces el *output* va hacia 0 y el límite vuelve a subir.



**Figura 2.20:** Simulación de voltaje y frecuencia de salida del VCbO para un input de 1V, 2V, 4V de arriba a abajo. Para la simulación se utilizó el software Circuit Simulator de Falstad (<http://lushprojects.com/>).

Tal como vemos en la figura 2.20, se observa en el simulador cómo la frecuencia de salida del oscilador varía proporcionalmente con el voltaje de control. En nuestro caso hemos reescalado los valores de GFP de 0 – 255 a valores de 0 – 5V. En el caso de 1V observamos como tenemos una frecuencia de salida de aproximadamente  $150\text{Hz}$ , para 2V obtenemos  $280\text{Hz}$  y para 5V  $360\text{Hz}$ .

La variación temporal entre los valores de control de voltaje dados por los datos de luminosidad en la trampa de microfluídica corresponden a variaciones de voltaje muy lentas debido a que el período promedio de la oscilación en el sistema de quorum sincronizado es aproximadamente del orden de la hora. Debido a este hecho en nuestro sistema modificamos el tiempo en el que se alimentan los datos de fluorescencia mediante una variación del tiempo de muestreo del .csv mediante una frecuencia de barrido de un dato cada segundo, obteniendo así una variación perceptible de la totalidad de los datos en un

tiempo razonable.

El hecho de tener dos escalas temporales de diferente orden acopladas entre sí supone un problema para el desarrollo futuro de sistemas bactoelectrónicos. No obstante en este punto, en el que meramente se propone una modelización de dichos sistemas, podemos transponer la escala temporal bacteriana a la escala temporal de los sistemas de audio análogos mediante un reescalamiento.

### 2.4.3. Sistema Extendido de *Voltage Controlled BactoOscillator*

El modelo presentado en la sección anterior nos sirve como punto de partida para desarrollar un sistema extendido de síntesis análoga mediante el uso de un oscilador bacteriano. En esta sección planteamos el uso de un modelo extendido de VCbO basado en un VCO de síntesis análoga tipo Eurorack<sup>x</sup> y su implementación mediante el software VST para DAW VCV Rack.

A diferencia del VCO básico presentado en la sección anterior, en ésta proponemos el uso de un VCO desarrollado por Befaco<sup>xi</sup> el cual forma parte del estado del arte en síntesis analógica. Este oscilador, llamado EVEN VCO, básicamente amplía el sistema anterior con la posibilidad de seleccionar mediante un interruptor de 10 posiciones octavas de (C0 – C9) y de seguir con una precisión de 1 cent entre C0-7, de 4 cents en C8 y de 13 cents en C9. A parte de esta característica el EVEN VCO permite seleccionar, además de la salida sinusoidal del VCO básico de la sección anterior, salidas triangulares, de rampa, de modulación de ancho de pulso (PWM), y salida llamada EVEN, la cual enfatiza los armónicos impares.

---

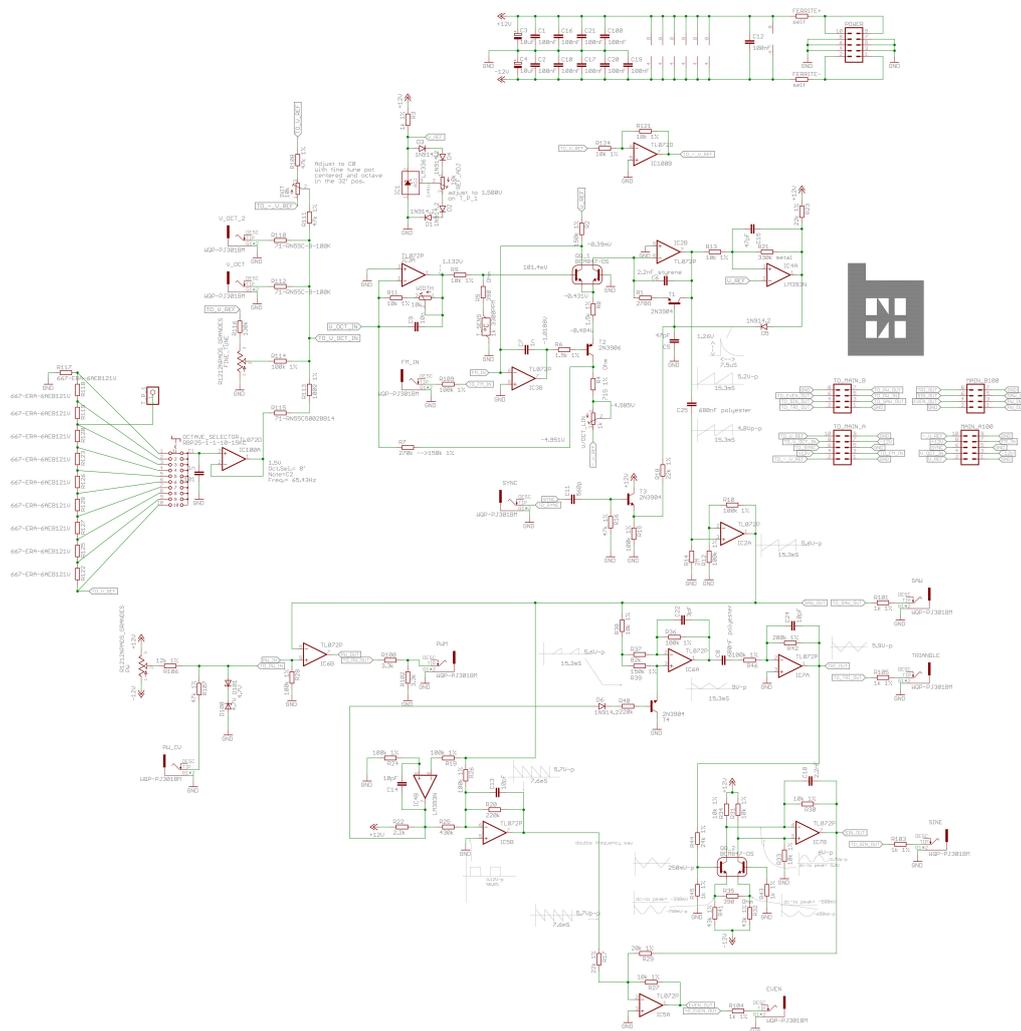
<sup>x</sup>Eurorack un formato de sintetizadores modulares originalmente especificada en el año 1966 por Doepfer Musikelektronik.

<sup>xi</sup><https://www.befaco.org>



**Figura 2.21:** Módulo para VCV Rack del EVEN VCO de Befaco.

El EVEN VCO, como podemos observar en la figura 2.22, dispone de variws entradas. De entre todas mencionamos la V/Oct, que son dos entradas de control de tono sumadas a la selección principal del octavador y del control de altura, la entrada FM, que proporciona un control lineal del tono y finalmente la PWM CV, que proporciona un control de ancho de pulso sumado al potenciómetro mediante control de voltaje.



**Figura 2.22:** Diagrama del circuito electrónico del EVEN VCO de Befaco.

Esta última entrada es la que vamos a utilizar para alimentar la señal de GFP al VCO ya que permite, mediante un señalamiento de control de voltaje (CV), modular el ancho del pulso de salida. Para mandar los datos en formato .csv al sistema DAW VCV Rack utilizamos el módulo `vOSCcv`<sup>XII</sup> el cual es un módulo Open Sound Control (OSC) genérico que nos permite leer mensajes OSC y mandarlos a CV.

<sup>XII</sup><https://github.com/j4s0n-c/trowaSoft-VCV>

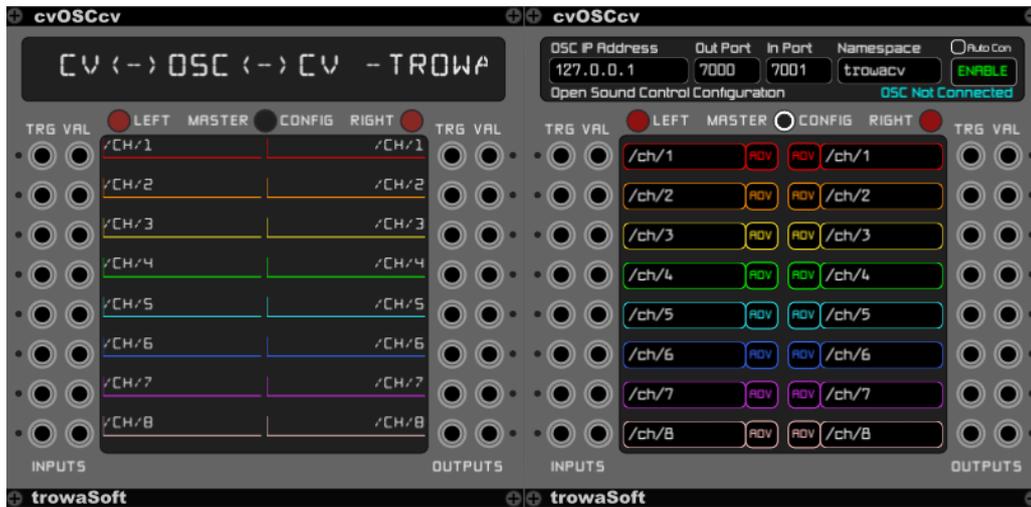


Figura 2.23: Módulo de implementación de señales de OSC a CV para VCV Rack.



Figura 2.24: Módulo completo de implementación para el bactooscilador para VCV Rack.

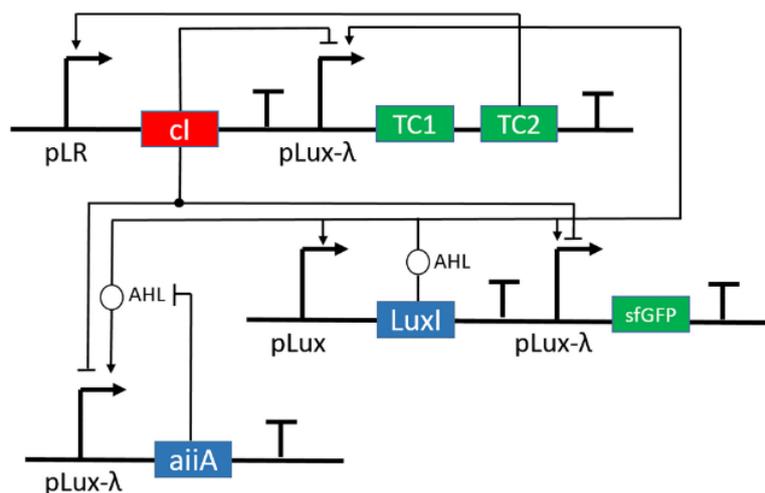
#### 2.4.4. Modulador de Frecuencia Optogenético Ajustable

En las dos secciones anteriores hemos desarrollado un sistema bactoelectrónico en el cual las oscilaciones de fluorescencia en un sistema bacteriano se transforman a un señalamiento sonoro. La construcción genética de relojes, acoplados entre sí a través de la molécula de AHL, permite variar la frecuencia de oscilación mediante la variación del flujo dentro del canal de microfluídica, degradando en mayor o menor medida la concentración de AHL. No obstante como ya hemos mencionado anteriormente, y podemos ver en la figura 2.15, el oscilador de Danino tiene una relación lineal entre la amplitud de las

oscilaciones y el período.

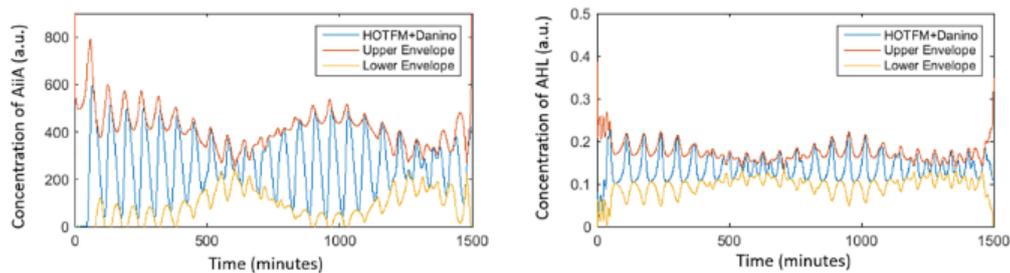
Este hecho impone una restricción en nuestro sistema bactoeléctrico ya que dentro de los sistemas de síntesis lo que se pretende en algunos casos es poder variar la frecuencia de entrada del sistema sin variar su amplitud, como en el caso de la síntesis de frecuencia modulada (síntesis FM).

La relación lineal entre frecuencia y amplitud en el oscilador de Danino es una consecuencia de la dependencia del período de oscilación como función del tiempo que tardan las concentraciones de AiiA y de LuxI en degradarse. No obstante una manera de poder sortear esta restricción sería disminuir el período de degradación, lo cual se podría lograr en principio mediante una construcción genética con una autoregulación negativa de AiiA (ver figura 2.25). Esto permitiría de alguna manera modular la amplitud para modular la frecuencia. Este sistema opera transformando la topología del oscilador de Danino con retroalimentación negativa amplificada en el sistema conocido como oscilador de Smolen, el cual se conoce que puede lograr un ajuste de la frecuencia de respuesta del sistema [141][147].



**Figura 2.25:** Circuito genético del oscilador tipo Smolen, donde LuxI se coloca bajo el promotor Lux, similar al oscilador de Danino, pero donde AiiA se coloca bajo el promotor Lux-Tet, el cual se puede activar por la AHL producida por LuxI y reprimida por el represor lambda [151].

Este oscilador de Smolen, aunque no se ha implementado experimentalmente aún, ha sido simulado como modelo teórico en una construcción genética que además permite seleccionar la frecuencia de salida mediante un señalamiento optogenético y que en combinación con el oscilador de Danino permite obtener distintos comportamientos oscilatorios, tal como podemos ver en la figura 2.26, [151].



**Figura 2.26:** Cuando se mezclan dos colonias del oscilador de Danino y del oscilador de Smolen se pueden lograr comportamientos oscilatorios de tipo pulso en las concentraciones de AiiA y AHL, los cuales se podrían aprovechar en futuras implementaciones bacteoelectrónicas para sistemas de síntesis de modulación de amplitud [151].

Sin entrar en detalles sobre la implementación biológica del sistema en cuestión solo mencionaremos que cada vez más, dentro del campo de estudio de la biología sintética, se está investigando en nuevas posibilidades de diseño y de construcción de sistemas ingenierizados en bacterias con diferentes posibilidades oscilatorias [152].

Por otro lado comentaremos que estas nuevas construcciones genéticas en la actualidad están usualmente enfocadas al uso de señalamientos con reporteros lumínicos, donde normalmente para ello se utilizan proteínas de fluorescencia. No obstante para implementar sistemas bidireccionales de comunicación entre elementos bióticos bacosintéticos y elementos abióticos electrónicos, como en el caso del VCbO, sería más útil utilizar interfaces de transducción de señalamiento de tipo electrónico ya que éstas son más compatibles con sistemas basados en semiconductores. Así en la siguiente sección exploraremos la posibilidad de utilizar construcciones sintéticas con señalamientos electrónicos dentro del campo de la electromicrobiología sintética.

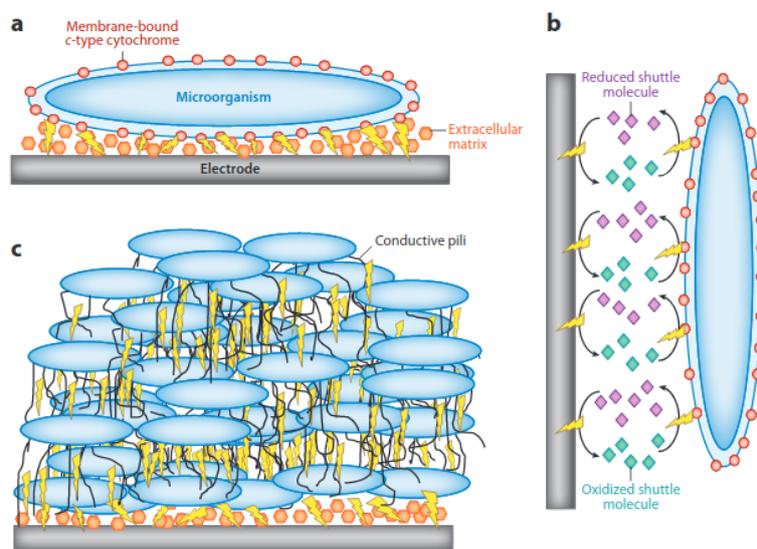
### 2.4.5. Electromicrobiología Sintética y Osciladores Bacterianos Electrónicos

La electromicrobiología es el campo de estudio entorno al intercambio de electrones entre microorganismos y dispositivos electrónicos y sobre las propiedades y funcionalidades de éstos [153]. En la naturaleza existen varios microorganismos que tienen la habilidad de intercambiar electrones con electrodos, tal como las bacterias *Geobacter Sulfurreducens* o *Shewanella Oneidensis*, las cuales pueden contribuir a una diversidad de aplicaciones dentro del campo de la bioelectrónica, como sería el caso en nuestro VCbO.

Como comentábamos, la posibilidad de crear y comunicar sistemas que integren partes biológicas y electrónicas se puede propiciar mediante el uso de ciertas propiedades electrónicas en microorganismos. No obstante muchos de los reporteros que se utilizan en biología sintética son de naturaleza lumínica. Debido a esto hecho en esta sección pondremos conceptualizar un sistema biológico sintético con propiedades de señalización electrónicas.

Dentro de la literatura en electromicrobiología se han estudiado tres mecanismos de transferencia de electrones a electrodos que se podrían implementar en un sistema VCbO [154]. El primero es una transferencia de electrones de corto alcance en asociación con un electrodo de superficie mediante proteínas tipo redox-activas, como en el caso de los citocromos de tipo c asociados con matrices extracelulares (figura 2.27, a). El segundo es un mecanismo de transferencia de electrones basado en la reducción de lanzaderas (*shuttles*) de electrones liberadas por las células (figura 2.27, b). El tercer mecanismo se basa en interacciones de largo alcance donde existe un transporte de electrones a través de un biofilm conductivo mediante pilis conductivos (figura 2.27, c).

Se conoce que en *G.Sulfurreducens* utiliza el mecanismo (c) para crear biofilms de alta conductividad. Aunque hasta la fecha aún no hay medidas exactas sobre la conductividad específica en estos biofilms, ha habido experimentos que demuestran que las conductividades de *G.Sulfurreducens* creciendo en electrodos de oro son similares a la de polímeros

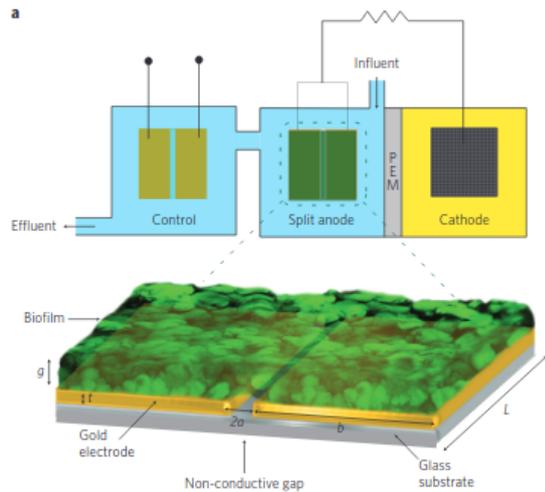


**Figura 2.27:** Mecanismos potenciales para la transferencia de electrones entre microorganismos y electrodos [153]. Para el caso de nuestro VCbO el electrodo estaría acoplado al VCO y finalmente a la salida de audio.

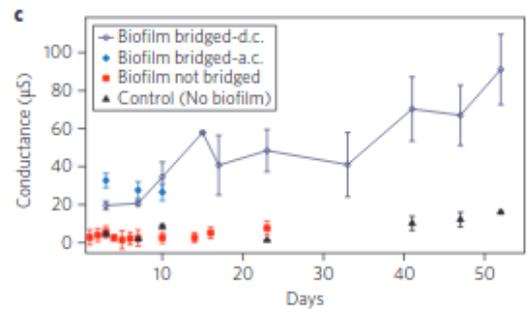
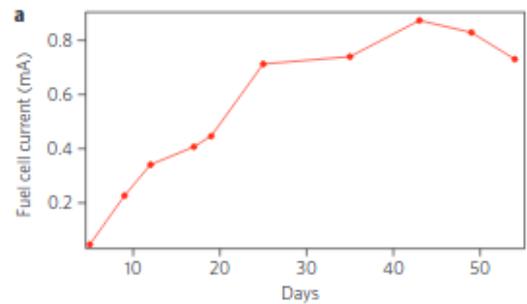
conductivos sintéticos orgánicos [155](ver figura 2.28).

Hasta la fecha no se sabe con exactitud si los pilis que forma *Geobacter* son electrónicamente conductivos en sí, pero se ha demostrado que el gen PilA asociado al pili de *Geobacter Metallireducens* se requiere para una oxidación-reducción óptima de Fe(III) y para la producción de corriente [156]. Lo que esto supone es que en el caso de que existiera un gen asociado a la producción de corriente en *Geobacter* se podrían buscar los mecanismos genéticos para inhibirlo o expresarlo mediante un sistema de quorum, que al igual que en el oscilador de Danino se difundiera intra y extracelularmente. Esto permitiría desarrollar un sistema de *quorum sensing* con expresión de conductividad eléctrica en vez de fluorescencia, lo cual sería ideal para un sistema bactoeléctrico, como para el caso del oscilador bacteriano electrónico que se muestra en la figura 2.32.

Un posible construcción genética que implementara esta idea podría consistir en el uso del *chasis* del microorganismo *G.Sulfurreducens* con un *backbone* y junto a las tres unidades transcripcionales del sistema de *quorum sensing* integradas para crear un vector. Este sistema permitiría la sobreexpresión o inhibición del gen PilA asociado a la conductividad



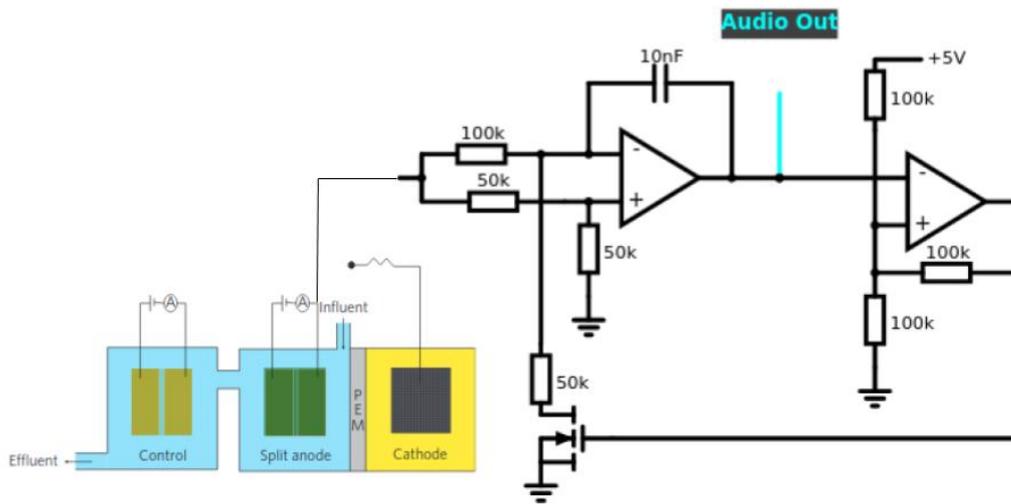
(a) Esquema de la celda microbiana con dos electrodos de oro que sirven como ánodo, separado del cátodo mediante una membrana de intercambio de protones (PEM).



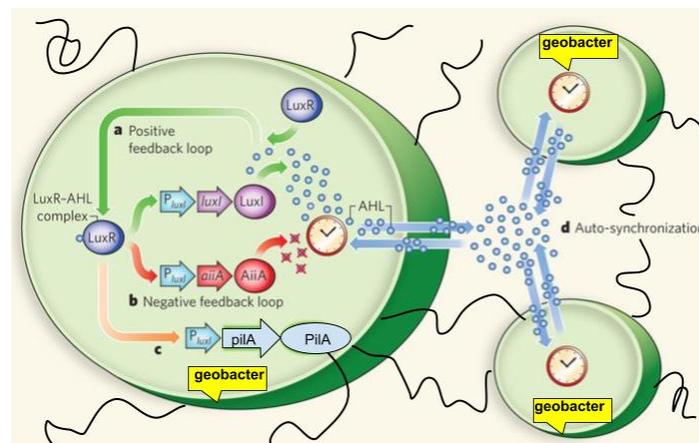
(b) Medidas y configuración para la obtención de los datos de conductancia. Corriente producida en el tiempo por *G.Sulfurreducens* y comparación de las conductividades con diferentes métodos.

**Figura 2.28:** El uso de *G.Sulfurreducens* en dispositivos electrónicos permite medir su conductividad que es del orden de  $5 \text{ mS cm}^{-1}$ , comparables a nanoestructuras sintéticas metálicas. Aparte *G.Sulfurreducens* puede conducir a distancias del orden de los centímetros, más de 1000 veces el tamaño de la bacteria en sí. [155].

eléctrica del sistema en función de las moléculas de AHL de *quorum sensing*.



**Figura 2.29:** Propuesta de sistema bactoeléctrico generador de oscilaciones de corriente en bacterias *G.Sulfurreducens* acoplado a un dispositivo de síntesis de audio analógico de control de voltaje. El medio, azul, en contacto con los electrodos de oro sería el encargado de transportar las concentraciones de moléculas de *quorum sensing* encargadas de generar el acoplamiento y las oscilaciones en el grupo de bacterias.



**Figura 2.30:** Construcción genética dentro del *chassis* de *Geobacter* donde están integradas las tres unidades transcripcionales de *quorum sensing* en el vector de expresión del gen *pilA*.

En general los microorganismos eléctricamente activos tienen el potencial para realizar contribuciones significativas dentro del campo de la bioelectrónica [157]. La habilidad de ciertos microorganismos para censar el ambiente, y en general una gran diversidad de señales químicas, junto a la posibilidad de traducir una respuesta mediante una señal eléctrica puede conllevar a futuras implementaciones y desarrollos de biosensores y de dispositivos de biocomputación [158].

Para avanzar en esta dirección hace falta que, aparte de la experimentación *in-vivo* tanto en microbiología como en biología sintética, ésta se complemente con la búsqueda de modelos, que más allá de ajustarse a los datos experimentales creen analogías de carácter general entre determinados formalismos matemáticos y procesos físicos. Por este motivo en el siguiente apartado desarrollaremos un modelo matemático que permita entender el fenómeno de oscilación en colonias de bacterias a partir de un modelo de osciladores de van der Pol acoplados.

## 2.5. Frentes de Sincronización en un Sistema Espacialmente Extendido de van der Pol

A lo largo de esta tesis hemos visto hasta ahora cómo la sincronización en poblaciones extendidas de elementos oscilatorios que interactúan entre sí es un fenómeno destacable que ha llamado la atención en distintos campos de las ciencias [159]. Como ya describimos en el primer capítulo 1, uno de los primeros reportes históricos referentes a este fenómeno se deben al médico y naturalista alemán Engelbert Kämpfer, el cual después de un viaje a Siam durante la segunda mitad del siglo XVII describe cómo un enjambre de luciérnagas

“hide their lights all at once, and a moment after make it appear again with the utmost regularity and exactness” [160].

Este mecanismo de emisión sincronizada de pulsos de luz en una población de lu-

ciérnagas ha sido investigado posteriormente por biólogos [161] y a través del estudio de modelos simplificados de osciladores acoplados [137].

Un fenómeno biológico paralelo pero dentro de los dominios microscópicos es el que hemos investigado a lo largo de este capítulo en el uso del redes de regulación genética en poblaciones de bacterias sincronizadas a través de mecanismos de *quorum sensing* [145][162][146]. Contrariamente a las luciérnagas, estos sistemas biológicos están ingenierizados para producir oscilaciones sincronizadas mediante la expresión de una proteína de fluorescencia en un dispositivo de microfluídica.

En ambos sistemas, compuestos por un grupo de relojes biológicos que interactúan entre sí y su ambiente, la sincronización de la frecuencia es una aproximación lógica ya que en ambos sistemas nos interesa explorar los estados en los cuales la tasa de cambio de la luminosidad es la misma, más que la tasa de cambio de las fases en cuestión.

Uno de los principales modelos matemáticos para estudiar este tipo de sistemas que exhiben sincronización fue introducido por Winfree [163] y luego refinado por Kuramoto [164] y otros [165][166]. (Una revisión exhaustiva de la literatura y de las perspectivas del campo de los modelos matemáticos de sincronización se puede encontrar en el artículo panorámico de Pikovsky [167]).

A continuación proponemos un sistema basado en un modelo con un oscilador de ciclo límite, el cual se ha estudiado ampliamente en modelos de relojes físicos y biológicos. Dicho modelo está basado en un oscilador de van der Pol modificado [168][169].

### 2.5.1. Solución de Onda Viajera a la Ecuación Modificada del Oscilador de van der Pol

La ecuación diferencial de segundo orden homogénea de van der Pol correspondiente a un oscilador con amortiguamiento no lineal corresponde generalmente a una ecuación

del movimiento del tipo:

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u - \epsilon(1 - 2u^2)\dot{u} = 0, \quad (2.1)$$

donde  $u \in \mathbb{R}$  es la variable dinámica,  $\omega_0$  es la frecuencia lineal, y  $\epsilon > 0$  es un parámetro escalar de no linealidad del sistema. Un aspecto importante de esta ecuación es la relación entre el amortiguamiento negativo proporcional a  $-\dot{u}$  y el amortiguamiento no lineal  $u^2\dot{u}$ , el cual conduce a la existencia de oscilaciones de ciclo límite autosostenidas.

En términos generales podemos transformar esta ecuación mediante una transformación a un marco de referencia rotativo [170] tal que

$$u(t) = \sqrt{2} (\alpha(t)e^{i\omega_0 t} + \alpha^*(t)e^{-i\omega_0 t}), \quad (2.2)$$

con una amplitud compleja que varía lentamente como

$$\alpha = \sqrt{2}(u + iv), \quad (2.3)$$

donde  $u$  y  $v = \dot{u}$  denotan la posición y el momento conjugado respectivamente. En este marco rotativo, uno puede despreciar los términos correspondientes a oscilaciones rápidas en la ecuación 2.2 mientras que se cumpla que  $\epsilon \ll 1$ . Esto a la fin nos permite escribir 2.2 como una ecuación de Stuart-Landau del tipo

$$\dot{\alpha}(t) = \frac{\epsilon}{2} (1 - |\alpha(t)|^2) \alpha(t), \quad (2.4)$$

la cual describe la dinámica del oscilador. En este caso para el estado estacionario, i.e. cuando  $\dot{\alpha}(t) = 0$ , la ecuación admite la existencia de un ciclo límite definido por  $|\alpha(t)|^2 = 1$ .

Para nuestro caso introducimos una versión modificada de 2.1, en la cual la ecuación

del movimiento viene descrita por

$$\ddot{u} = -\epsilon^2 u + \nu \left[ 1 - \left( u^2 + \frac{\dot{u}^2}{\epsilon^2} \right) \right] \dot{u}, \tag{2.5}$$

y para la cual podemos definir  $\ddot{u} = f(u, \dot{u})$ .

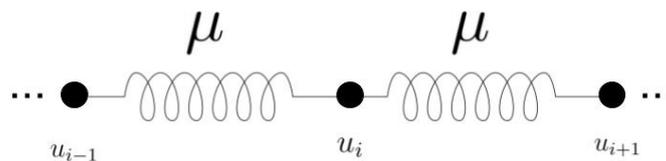
Observamos primeramente que 2.5 corresponde a una superposición de la ecuación de van der Pol clásica 2.1 y la ecuación de Rayleigh definida por

$$\ddot{u} + \omega_0^2 u - \epsilon(\dot{u} - \dot{u}^3) = 0. \tag{2.6}$$

Así nuestra ecuación 2.5 contiene el término cúbico proporcional a  $\dot{u}^3$  que posee la ecuación de Rayleigh 2.6 y que no posee la ecuación clásica de van der Pol 2.1, y a la vez contiene el término  $u^2 \dot{u}$  que no posee la ecuación de Rayleigh 2.6 y que si posee la ecuación clásica de van der Pol 2.1.

Para el análisis de nuestra ecuación modificada de van der Pol 2.5 partimos así del caso en el que  $\nu = 1$ . Para ello discretizamos el sistema suponiendo que cada elemento  $u_i$  está acoplado a sus primeros vecinos  $u_{i-1}$  y  $u_{i+1}$  a través de una constante elástica  $\mu$  (ver figura 2.31). En este caso obtenemos que

$$\ddot{u}_i = f(u_i, \dot{u}_i) + \mu(u_{i+1} + u_{i-1} + 2u_i - 2u_i). \tag{2.7}$$



**Figura 2.31:** Diagrama de nuestro sistema donde se observa los osciladores discretizadas acoplados a primeros vecinos.

Definimos ahora el término  $u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i$  como la discretización de la derivada parcial  $\partial^2 u / \partial x^2 \equiv u_{xx}$  de tal manera que podamos reescribir la ODE como una PDE de la siguiente manera,

$$u_{tt} \cong f(u, u_t) + 2\mu u + \mu u_{xx} \quad (2.8)$$

y finalmente obtenemos para una dimensión espacial que

$$u_{tt} = -\omega^2 u + \left[ 1 - \left( u^2 + \frac{u_t^2}{\omega^2} \right) \right] u_t + 2\mu x + \mu u_{xx}. \quad (2.9)$$

Demostramos ahora que la ecuación del tipo onda viajera  $u = \sin(\xi)$ ,  $\xi \equiv \omega t + ax$  puede ser solución de 2.9 para una determinada elección de parámetros.

Calculamos primero las derivadas temporales

$$u_t = \omega \cos(\xi), u_{tt} = -\omega^2 \sin(\xi), \quad (2.10)$$

y espaciales

$$u_x = a \cos(\xi), u_{xx} = -a^2 \sin(\xi). \quad (2.11)$$

Entonces si sustituimos en 2.9 de tal manera que

$$-\omega^2 \sin \xi = -\omega^2 \sin \xi + \left[ 1 - \left( \sin^2 \xi + \frac{\omega^2 \cos^2 \xi}{\omega^2} \right) \right] \omega \cos \xi + 2\mu \sin \xi + \mu (-a^2 \sin \xi) \quad (2.12)$$

obtenemos la solución trivial de frente de onda con  $\mu = 0$  y número de onda  $a = \sqrt{2}$  tal que

$$u = \sin(\omega t + \sqrt{2}x), \quad (2.13)$$

la cual es una solución del sistema independientemente del valor de  $\nu$ .

Con el objetivo de encontrar una frecuencia asintótica, linealizamos la ecuación 2.5 y tomamos  $\nu \ll 1$ , así podemos despreciar el término disipativo. Por otro lado podemos añadir a la ecuación 2.5 un acoplamiento entre sus elementos mediante la matriz Laplaciana  $L = [L_{ij} : i, j = 1, \dots, n]$  para el grafo  $\mathcal{G}$ , de tal manera que  $L_{ij} = a_{ij}$  si  $i \neq j$  y  $L_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ . De esta manera obtenemos la siguiente ecuación

$$\ddot{u} = -\omega^2 u + \mu \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.14)$$

la cual podemos reescribir como

$$\ddot{u} = -(\omega^2 - \mu A_i) u_i, \quad (2.15)$$

donde  $A_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$  para  $i = 1, \dots, N$ . En el caso que  $a_{ij} = 1$ , correspondiente a una red completamente conectada de osciladores, entonces el sistema se puede escribir como

$$\ddot{u} = -(\omega^2 - \mu(N - 1)) u, \quad (2.16)$$

suponiendo que se ha establecido un régimen sincronizado, a partir del cual se puede llegar a una frecuencia de sincronización

$$\Omega_{sync} = -\sqrt{\omega^2 - \mu(N - 1)}. \quad (2.17)$$

Aparte de este hecho, esta reducción sugiere que el comportamiento oscilatorio sincronizado sucede para valores suficientemente pequeños de  $\mu$ , y a su vez cuando

$$\omega^2 - \mu(N - 1) > 0. \quad (2.18)$$

Si esto no fuera así, entonces tendríamos un comportamiento exponencialmente creciente. De igual manera podemos observar que a menos que todos los valores de  $a_{ij}$  sean iguales no se pueden sacar estas conclusiones. Para analizar el caso general donde no todos

los  $a_{ij}$  son iguales se puede utilizar un método que introduzca perturbaciones y que utilice la ecuación de Fokker-Planck [168].

En el siguiente apartado se desarrolla un método de simulación numérica basado en la técnica de diferencias finitas para recuperar el resultado analítico y observar la solución a diferentes valor del acoplamiento  $\mu$ , correspondientes en este modelo a diferentes valores de concentración de las moléculas AHL que producen el acoplamiento extracelular en el oscilador de Danino [145].

### 2.5.2. Simulación Numérica Mediante el Método de Diferencias Finitas

Para el desarrollo de la simulación numérica mediante el método de diferencias finitas seguimos el libro “Finite Difference Computing with PDE’s - A Modern Software Approach” [171], enfocándonos en la resolución de la ecuación de onda. A continuación describimos los pasos del método, para después mostrar el código comentado de la simulación.

El método utilizado parte de la ecuación genérica

$$u_{tt} = \nabla \cdot (c^2 \nabla u) + f \quad (2.19)$$

la cual transformamos para llegar a 2.9. Partimos primeramente de una discretización de los dominios temporales  $[0, T]$  y espaciales  $[0, L]$  tales que:

$$0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{N_t-1} < t_{N_t} = T \quad (2.20)$$

$$0 = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{N_x-1} < x_{N_x} = L, \quad (2.21)$$

de tal manera que para un conjunto distribuido de puntos podemos introducir las

constantes de espaciamiento  $\Delta t$  y  $\Delta x$  en una malla para obtener

$$x_i = i\Delta x, \quad i = 0, \dots, N_x, \quad t_n = n\Delta t, \quad n = 0, \dots, N_t. \quad (2.22)$$

La solución  $u(x, t)$  se obtiene para los puntos de la malla, para la cual introducimos la notación  $u_i^n$ , la cual aproxima la solución exacta en los puntos  $(x_i, t_n)$  para  $i = 0, \dots, N_x$  y  $n = 0, \dots, N_t$ .

A continuación cambiamos las derivadas por diferencias finitas de la siguiente manera

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x_i, t_n) \approx \frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{\Delta t^2}, \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} u(x_i, t_n) \approx \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}, \quad (2.24)$$

e introducimos la notación de operadores para las diferencias finitas

$$[D_t D_t u]_i^n = \frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{\Delta t^2}, \quad (2.25)$$

$$[D_t u]_i^n = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t}, \quad (2.26)$$

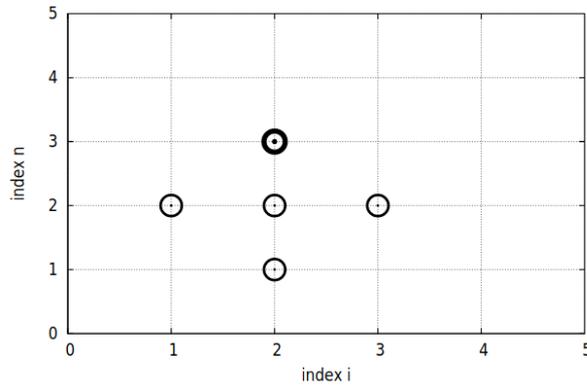
y en el caso espacial como

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x_i, t_n) \approx \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{\Delta x^2} = [D_x D_x u]_i^n. \quad (2.27)$$

Hacemos lo mismo con las derivadas de primer orden temporal, obteniendo así la versión algebraica de la PDE de 2.9 como

$$\left[ D_t D_t u = (\omega^2 + \mu) + \left[ 1 - \left( u^2 + \frac{1}{\omega^2} [D_t u]^2 \right) \right] [D_t u] + \mu [D_x D_x u] \right]_i^n. \quad (2.28)$$

La ecuación anterior se puede interpretar como un estencil el cual involucra los valores en los puntos 4 de la vecindad  $u_i^{n+1}$ ,  $u_{i\pm 1}^n$ ,  $u_i^n$ , y  $u_i^{n-1}$ , tal como podemos ver en la geometría de la figura 2.32.



**Figura 2.32:** Malla espacio-temporal, los círculos muestran puntos conectados en una ecuación de diferencias finitas.

De la misma manera en que hemos discretizado las derivadas tenemos que discretizar las condiciones iniciales,

$$\frac{\partial}{\partial t} u(x_i, t_n) \approx \frac{u_i^1 - u_i^{-1}}{2\Delta t} = [D_{2t}u]_i^0 \quad (2.29)$$

que en notación algebraica se puede escribir como,

$$[D_{2t}u]_i^n = 0, \quad n = 0, \quad (2.30)$$

la cual queda escrita como

$$u_i^{n-1} = u_i^{n+1}, \quad i = 0, \dots, N_x, n = 0, \quad (2.31)$$

y para la otra condición inicial tenemos

$$u_i^0 = I(x_i), \quad i = 0, \dots, N_x. \quad (2.32)$$

Así finalmente formulamos un algoritmo recursivo como

$$\begin{aligned}
 u_i^{n+1} = & \underbrace{\left( \Delta t^2(-\omega^2 + \mu) + \Delta t - \frac{\Delta t^2 \mu}{\Delta x^2} \right)}_A u_i^n \underbrace{- \Delta t (u_i^n)^2}_B - \underbrace{\frac{1}{\omega^2 \Delta t} (u_i^n)^3}_C \underbrace{- \Delta t (u_i^n)}_D \underbrace{- \Delta t (u_i^n u_i^{n-1})}_E \\
 & \underbrace{- \frac{1}{\omega^2 \Delta t} (u_i^{n-1})^3}_F \underbrace{- \frac{3}{\omega^2 \Delta t} (u_i^{n-1})(u_i^n)^3}_G \underbrace{- \frac{3}{\omega^2 \Delta t} (u_i^{n+1})^2 (u_i^n)}_H + \underbrace{\frac{\mu \Delta t^2}{\Delta x^2} (u_{i+1}^n)}_I - \underbrace{\frac{\mu \Delta t^2}{\Delta x^2} (u_{i-1}^n)}_J, \\
 (2.33)
 \end{aligned}$$

donde los parámetros  $A, \dots, J$  se muestran en el siguiente apartado en la parte de código.

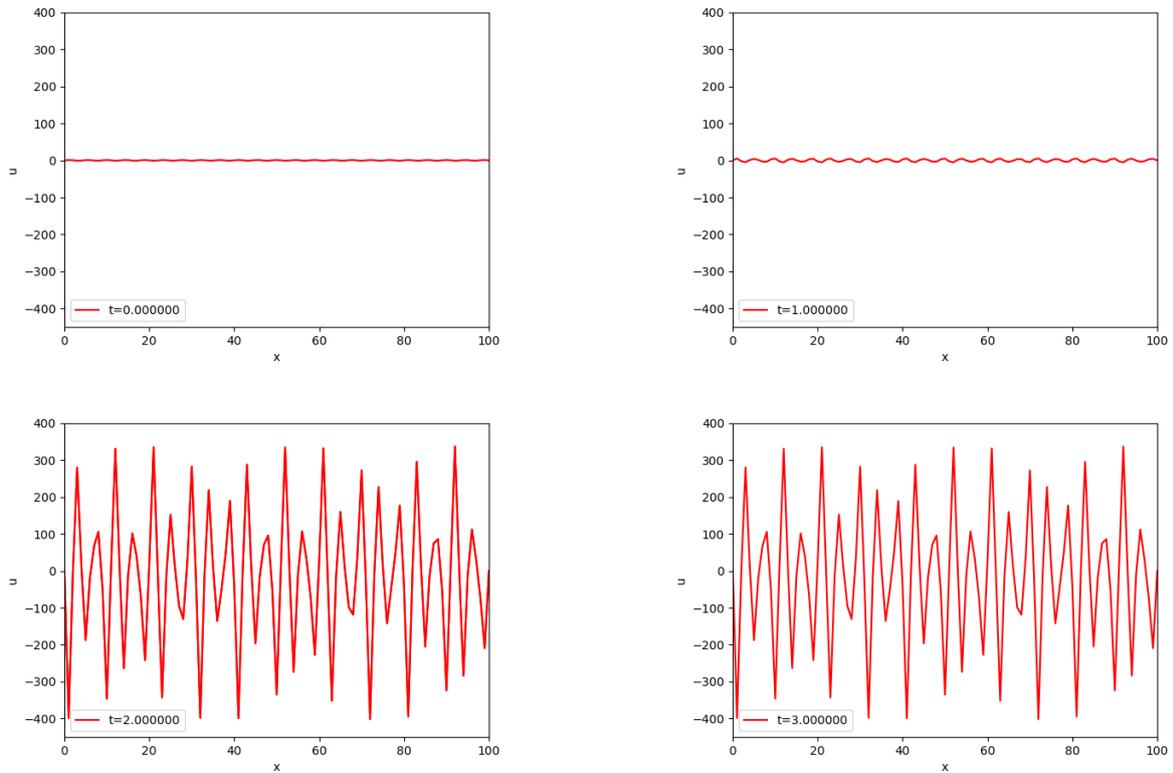
En la ecuación 2.33 surge un problema cuando  $n = 0$  ya que la fórmula para  $u_i^1$  involucra  $u_i^{-1}$  la cual no está definida en la malla. No obstante se puede utilizar la condición inicial 2.31 en  $n = 0$  para eliminar  $u_i^{-1}$ .

Finalmente podemos resumir el algoritmo como:

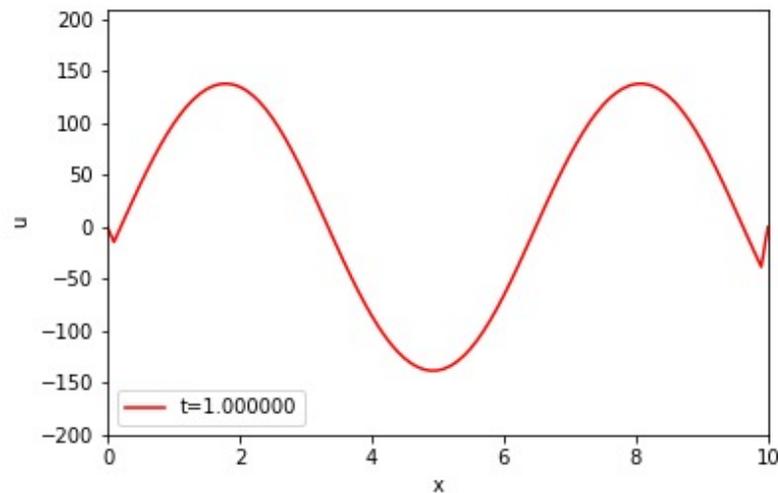
1. Calcular  $u_i^0 = I(x_i)$  para  $i = 0, \dots, N_x$ .
2. Calcular  $u_i^1$  a partir de 2.33 y tomar  $u_i^1 = 0$  en los puntos de frontera  $i = 0$  e  $i = N_x$  para  $n = 1, 2, \dots, N - 1$
3. Para cada paso de tiempo  $n = 1, 2, \dots, N_t - 1$  aplicar 2.33 para encontrar  $u_i^{n+1}$  para  $i = 1, \dots, N_x - 1$  y tomar  $u_i^{n+1} = 0$  para los puntos de frontera  $i = 0, i = N_x$ .

El algoritmo esencialmente consiste en un estencil móvil de diferencias finitas a través de todos los puntos de la malla y se puede observar en el código como un archivo en formato tipo vídeo.

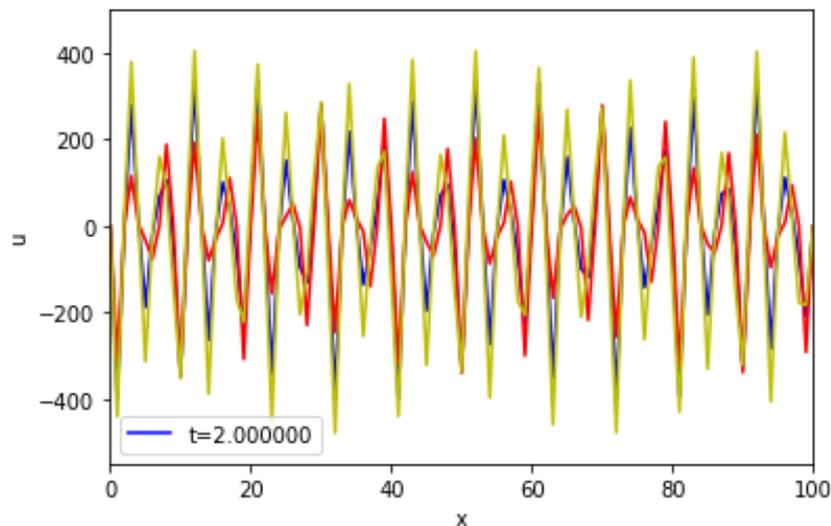
A continuación visualizamos en la figura 2.33 una de las soluciones iniciales empleando este método para cuatro pasos temporales.



**Figura 2.33:** Solución numérica obtenida en 4 pasos temporales para la ecuación de van der Pol modificada en el caso de  $\mu = 0$ . Observamos como en el paso de tiempo  $t=4$  se estabiliza la solución.



**Figura 2.34:** Solución numérica obtenida haciendo la malla  $\Delta t$  y  $\Delta x$  mas pequeña y una longitud en el dominio espacial de  $L = 10$  y  $\mu = 0$ . En este caso se observa como se recupera la solución sinusoidal que habíamos obtenido analíticamente. Se puede observar en los extremos  $x = 0$  y  $x = 10$  una pequeña perturbación correspondiente a la condición de frontera con extremos fijos.



**Figura 2.35:** Solución numérica obtenida con diferentes valores de  $\mu$ . En amarillo  $\mu = 2$ , en azul  $\mu = \sqrt{2}$  y en rojo  $\mu = 0$ . Vemos que a medida que decrece el parámetro de amortiguamiento  $\mu$  decrece la amplitud de la oscilación.

### 2.5.3. Código Python del Método de Diferencias Finitas

```
1 import sys
2 import math
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 #####
6 def solver(omega, dt, dx, mu, L, T, user_action=None):
7     """Solve VDPol on (0,L)x(0,T]."""
8     Nt = int(round(T/dt))
9     t = np.linspace(0, Nt*dt, Nt+1) # Mesh points in time
10    Nx = int(round(L/dx))
11    x = np.linspace(0, L, Nx+1) # Mesh points in space
12    """par metros"""
13    A=dt*dt*(-(omega*omega)+mu)+dt-(dt*dt*mu)/(dx*dx)
14    B=-dt*dt
15    C=-1/(omega*omega*dt)
16    D=-dt
17    E=-dt
18    F=-1/(omega*omega*dt)
19    G=-3/(omega*omega*dt)
20    H=-3/(omega*omega*dt)
21    I=(mu*dt*dt)/(dx*dx)
22    J=-(mu*dt*dt)/(dx*dx)
23 # Asegurar que dx y dt ason compatibles con x y t
24    dx = x[1] - x[0]
25    dt = t[1] - t[0]
26
27 # amp = lambda x: 0 if abs(x-L/2.0) > 0.1 else 1
28    amp = lambda x: (1)*math.sin(math.sqrt(2)*x)
29
30    u = np.zeros(Nx+1) # Soluci n del array en el nuevo paso de tiempo
31    u_n = np.zeros(Nx+1) # Soluci n a 1 paso de tiempo hacia atr s
32    u_nm1 = np.zeros(Nx+1) # Soluci n a 2 pasos de tiempo hacia atr s
33
```

```
34 import time; t0 = time.clock() # Medir CPU time
35
36 # Carga las condiciones iniciales en u_n
37 for i in range(0, Nx+1):
38     u_n[i] = amp(x[i])
39 if user_action is not None:
40     user_action(u_n, x, t, 0)
41
42 # Formula especial para el primer paso de tiempo
43 n = 0
44 for i in range(1, Nx):
45     u[i] = A*u_n[i]+B*u_n[i]*u_n[i]+C*u_n[i]*u_n[i]*u_n[i]-\
46     D*u_n[i]-E*u_n[i]*u_n[i]+F*u_n[i]*u_n[i]*u_n[i]-\
47     G*u_n[i]*u_n[i]*u_n[i]-H*u_n[i]*u_n[i]*u_n[i]+\
48     I*u_n[i+1]+J*u_n[i-1]
49
50     u[0] = 0; u[Nx] = 0
51 if user_action is not None:
52     user_action(u, x, t, 1)
53
54 # Cambia variables antes del proximo paso
55 u_nm1[:] = u_n; u_n[:] = u
56 for n in range(1, Nt):
57     # Actualiza todos los puntos internos en el paso t[n+1]
58     for i in range(1, Nx):
59         u[i] = A*u_n[i]+B*u_n[i]*u_n[i]+C*u_n[i]*u_n[i]*u_n[i]+\
60         D*u_nm1[i]+E*u_n[i]*u_nm1[i]+F*u_n[i]*u_n[i]*u_n[i]+\
61         G*u_n[i]*u_n[i]*u_nm1[i]-H*u_n[i]*u_nm1[i]*u_nm1[i]+\
62         I*u_n[i+1]+J*u_n[i-1]
63
64     # Insertar Condiciones de Frontera
65     u[0] = 0; u[Nx] = 0
66     if user_action is not None:
```

```
67         if user_action(u, x, t, n+1):
68             break
69 # Cambia variables antes del nuevo paso de tiempo
70     u_nm1[:] = u_n; u_n[:] = u
71     cpu_time = time.clock() - t0
72     return u, x, t, cpu_time
73
74 #####
75
76 def viz(
77     omega, dt, dx, mu, L, T, # PDE par metros
78     umin, umax, # Intervalo para u en los plots
79     animate=True, # Simulacion con animacion?
80     tool='matplotlib', # 'matplotlib' or 'scitools'?
81     solver_function=solver # Funcion con el algoritmo numerico
82 ):
83     """Correr el solver y visualizar u en cada paso de t"""
84
85     def plot_u_st(u, x, t, n):
86         """user_action function para el solver."""
87         plt.plot(x, u, 'r-',
88                 xlabel='x', ylabel='u',
89                 axis=[0, L, umin, umax],
90                 title='t=%f' % t[n], show=True)
91         # Deja que las condiciones iniciales esten en pantalla 2
92         # segundos, else inserta una pausa de 0.2 s entre cada plot
93         time.sleep(2) if t[n] == 0 else time.sleep(0.2)
94         plt.savefig('frame_%04d.png' % n) # para hacer la pelicula
95
96
97     class PlotMatplotlib:
98         def __call__(self, u, x, t, n):
99             """user_action function para el solver."""
```

```
100         if n == 0:
101             plt.ion()
102             self.lines = plt.plot(x, u, 'r-')
103             plt.xlabel('x'); plt.ylabel('u')
104             plt.axis([0, L, umin, umax])
105             plt.legend(['t=%f' % t[n]], loc='lower left')
106         else:
107             self.lines[0].set_ydata(u)
108             plt.legend(['t=%f' % t[n]], loc='lower left')
109             plt.draw()
110             time.sleep(2) if t[n] == 0 else time.sleep(0.2)
111             plt.savefig('plot_%04d.png' % n) # para hacer la pelicula
112
113     if tool == 'matplotlib':
114         import matplotlib.pyplot as plt
115         plot_u = PlotMatplotlib()
116     elif tool == 'scitools':
117         import scitools.std as plt # scitools.easyviz interface
118         plot_u = plot_u_st
119     import time, glob, os
120
121 # # Borra los frames antiguos de la pelicula
122 # for filename in glob.glob('tmp_*.png'):
123 #     os.remove(filename)
124
125 # Llama al solver y haz la simulacion
126 user_action = plot_u if animate else None
127 u, x, t, cpu = solver_function(
128     omega, dt, dx, mu, L, T, user_action)
129
130 # Posibilidad de crear los files del video
131 # fps = 4 # frames per second
132 # codec2ext = dict(flv='flv', libx264='mp4', libvpx='webm',
```

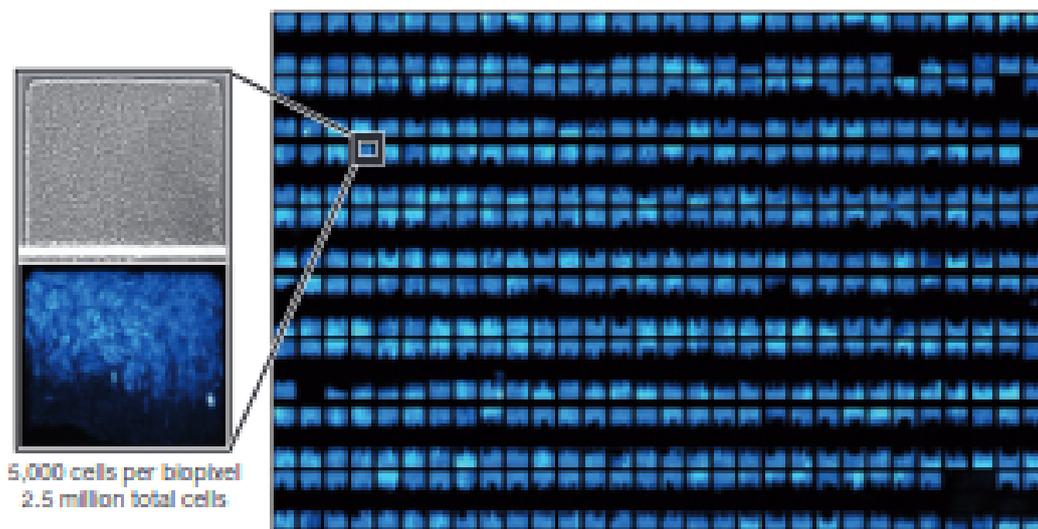
```
133 #             libtheora='ogg') # video formats
134 #     filespec = 'tmp_%04d.png'
135 #     movie_program = 'ffmpeg' # or 'avconv'
136 #     for codec in codec2ext:
137 #         ext = codec2ext[codec]
138 #         cmd = '%(movie_program)s -r %(fps)d -i %(filespec)s '\
139 #             '-vcodec %(codec)s movie.%(ext)s' % vars()
140 #         os.system(cmd)
141
142     return cpu
143
144 def test_sine():
145     def u_exact(x, t):
146         return math.sin(1*t+math.sqrt(2)*x)
147     def amp(x):
148         return u_exact(x, 0)
149
150     def assert_no_error(u, x, t, n):
151         u_e = u_exact(x, t[n])
152         diff = np.abs(u - u_e).max()
153         tol = 1E-13
154         assert -1 > tol
155         print('u_e')
156         solver(1, 1, 1, math.sqrt(2), 100, 2, user_action=None)
157
158 if __name__ == '__main__':
159     solver(1, 1, 1, math.sqrt(2), 100, 2, user_action=None)
160     test_sine()
```

## 2.6. Instalación AudioVisual: Biopixel Array

Para cerrar este capítulo mostramos en esta sección una instalación audiovisual que se presentó en el centro de arte "Los 14", en la Ciudad de México en Junio de 2019.

Esta instalación está orientada a mostrar y a difundir al público asistente el concepto de osciladores de bacterias de una manera visual, a partir de tecnología LED, y sonora, mediante un sistema de sonificación multicanal de audio.

Más detalladamente, el montaje de la instalación se basa en una investigación que amplía el experimento de frentes de onda lumínicos del oscilador de Danino a un sistema de biopixeles acoplados entre si, desarrollado por el mismo grupo dos años después [162]. Este sistema permite en general variar la concentración de AHL individualmente en cada uno de los 500 biopixeles, pudiendo controlar así la intensidad de fluorescencia en una pantalla lumínica.

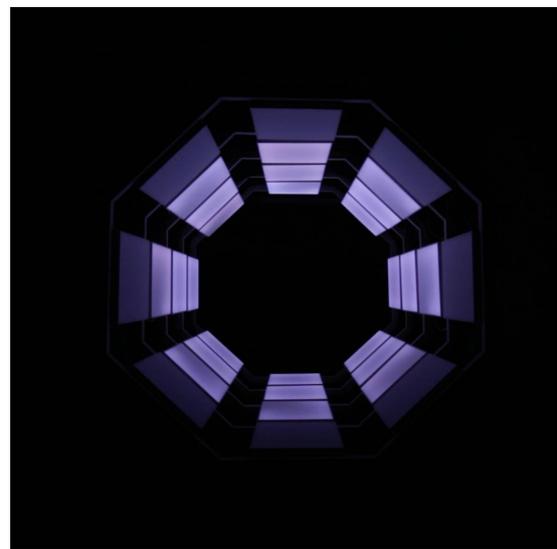
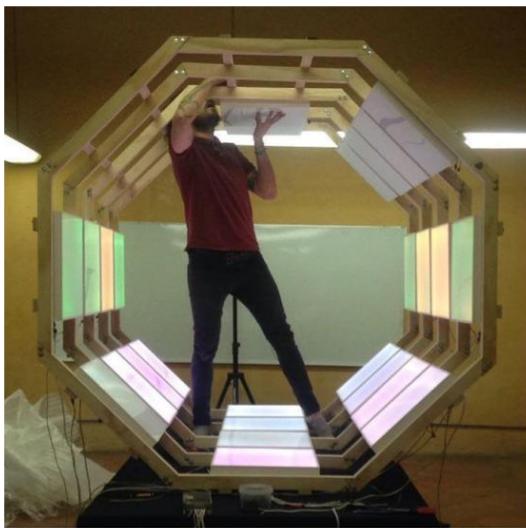


**Figura 2.36:** Array de biopixeles que amplían el sistema del oscilador de Danino de 1 trampa de microfluídica a 500 trampas.

Nuestra instalación inspirada en este sistema se compone de un conjunto de 32 cajas de madera que fueron construidas como un sistema modular, capaz de integrarse en una diversidad de configuraciones (ver figura 2.37). Cada caja que tiene una dimensión de 44cm de lado contiene en su interior 114 leds configurables tipo *ws2812b*, y en su parte frontal un acrílico blanco que la recubre dejando pasar la luz. La instalación se configura en dos líneas de 16 cajas cada una, situadas en el centro de la sala de exhibición (ver figura 2.39), formando así una instalación que en total mide aproximadamente 7m

de largo y 1m de ancho y que contiene en total aproximadamente 2300 leds.

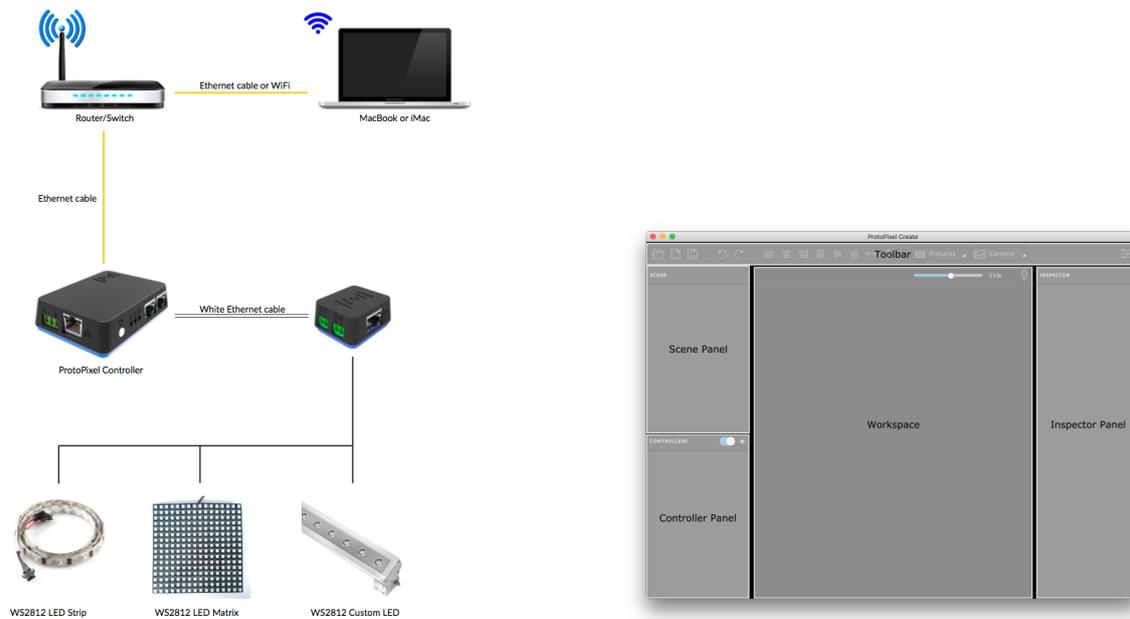
La salida de vídeo que se reproduce en las cajas emula a un sistema de microfluidica que en su interior contiene el sistema de relojes genéticos acoplados del oscilador de Danino. Alrededor de la sala se dispone un sistema multicanal de 4 altavoces, 2 de los cuales emiten la señal de sonificación de una fila, mientras que los otros emiten la sonificación correspondiente a la otra fila.



**Figura 2.37:** Diferentes ejemplos de disposiciones escultóricas creadas mediante el sistema modular de cajas de luz (Zuriguel y Virgen del Plug).

El sistema de iluminación led reproduce diferentes configuraciones obtenidas de los experimentos del oscilador de Danino [145]. Para hacerlo utiliza el *framework* de programación interactivo de luces ProtoPixel, desarrollado en Barcelona en el año 2014 como

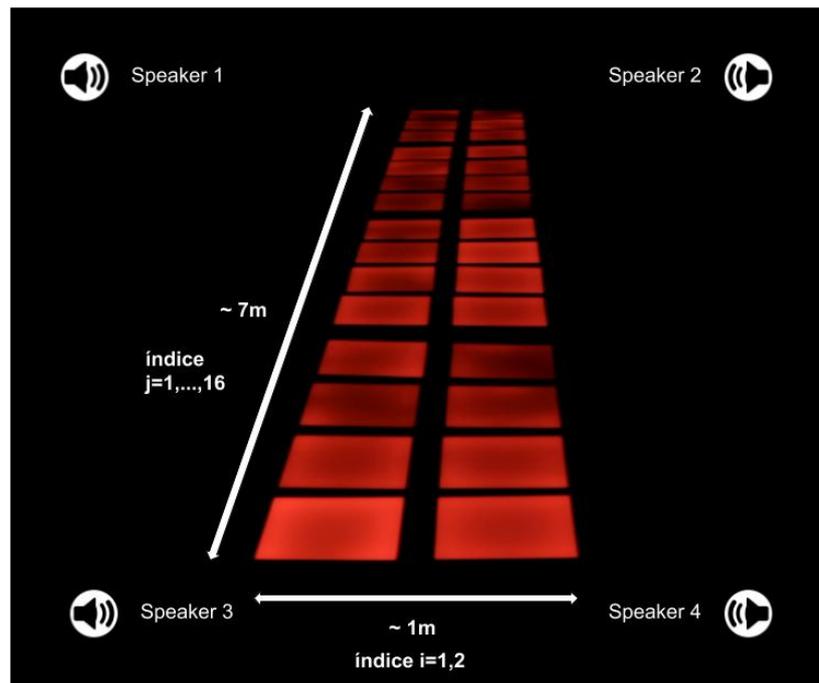
una *spin-off* de la Universitat Pompeu Fabra<sup>xiii</sup>. Este *framework* se compone de un sistema de hardware que consiste en un controlador físico, llamado ProtoPixel Controller, y un sistema de software, llamado Protopixel Create (ver figura 2.38).



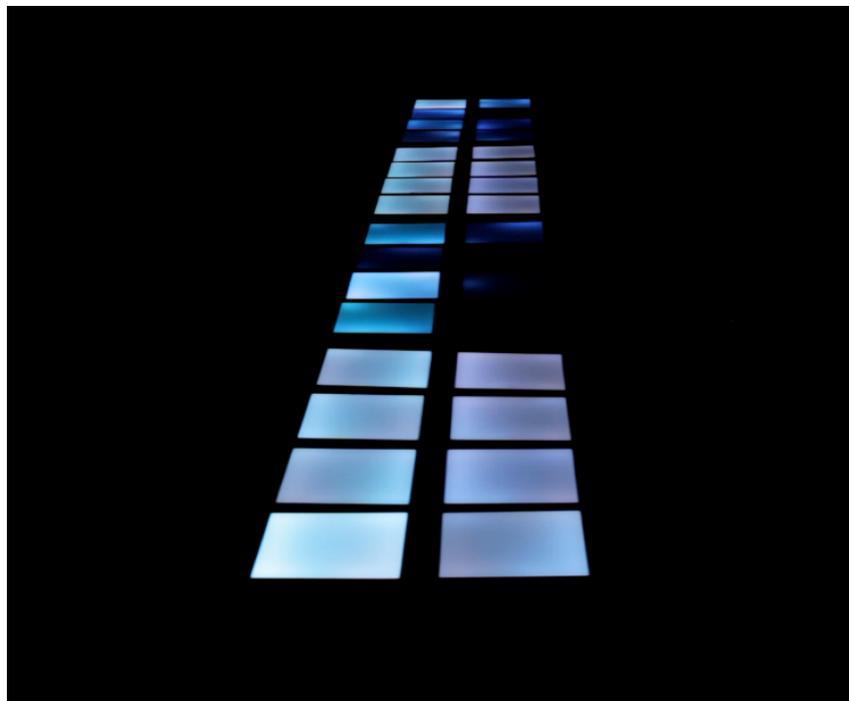
**Figura 2.38:** Diagrama del sistema de funcionamiento general de ProtoPixel e interfaz de usuario del sistema Protopixel Create. Este último viene instalado en el Mac y se comunica mediante ethernet a un router y al hardware de control. Éste se une al sistema de satélites al cual se conectan las tiras de led ws2812b.

La instalación dispone de 3 modalidades diferentes de funcionamiento dependiendo del sistema microfluídico que se quiera emular. Para la primera modalidad se reproduce el vídeo correspondiente a la figura 2.13 en ambas filas de cajas, emulando éstas una sola trampa de microfluídica (figura 2.40). En la segunda modalidad se emula en cada una de las dos filas de cajas un sistema de microfluídica diferente en rojo y en azul, los cuales tienen diferente flujo dentro de la trampa de microfluídica creando oscilaciones a diferente frecuencia en cada una de las trampas (figura 2.41). Finalmente la tercera configuración corresponde a la simulación numérica de GFP en ambas trampas, generando un rango de colores que representan mayor o menor luminosidad (figura 2.42).

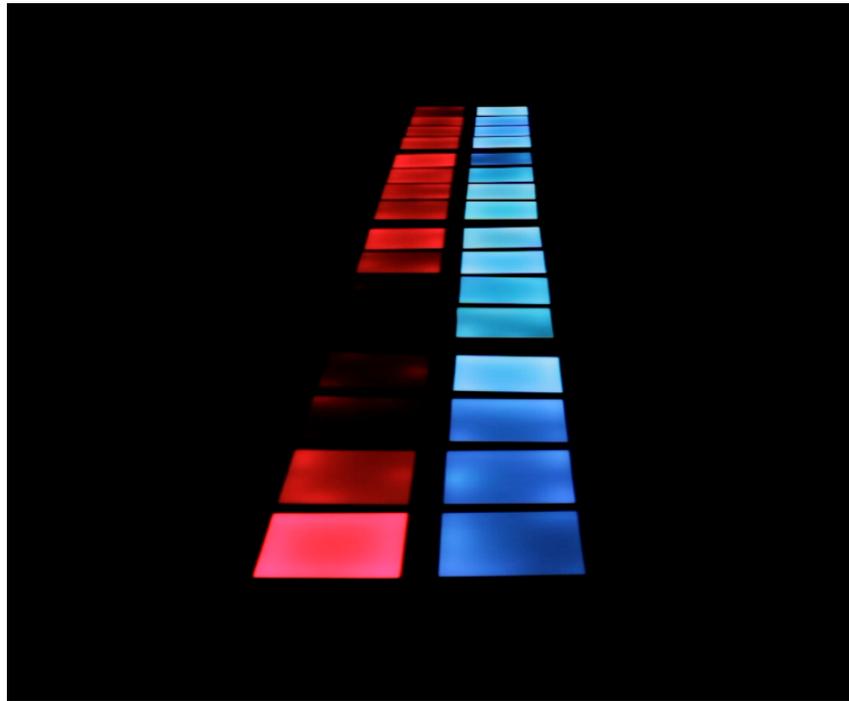
<sup>xiii</sup><https://protopixel.net>



**Figura 2.39:** Esquema de montaje en sala de la instalación con medidas aproximadas.



**Figura 2.40:** Fotograma de la instalación en la modalidad número 1, con ambas filas reproduciendo una trampa de microfluídica.



**Figura 2.41:** Fotograma de la instalación en la modalidad número 2, con una fila reproduciendo una trampa de microfluídica en rojo y otra en azul cada una con frecuencia de oscilación diferente.



**Figura 2.42:** Fotograma de la instalación en la modalidad número 3, con ambas filas reproduciendo un modelo de luminosidad de GFP que varía de azul a rojo.

La sonificación de la instalación se fundamenta en el sistema de síntesis por DSP desarrollado en la sección 2.18. En este caso para cada una de las 32 cajas el sistema manda mediante OSC al sintetizador en Python el valor de luminosidad que el sintetizador transforma a frecuencia. Los valores OSC de luminosidad de las cajas  $i = 1$  y  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  se mandan al altavoz 1 y para  $i = 2$  y  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  se mandan al altavoz 2, igualmente para  $i = 1$  y  $j = 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16$  se mandan al altavoz 3 y para  $i = 2$  y  $j = 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16$  se manda al altavoz 4, creando finalmente un sistema espacializado en función de la posición de la instalación.

## Capítulo 3

# Comunicaciones Vibracionales en Bacterias: Morfologías de Crecimiento y Transiciones de Morfotipo

A lo largo del capítulo anterior hemos descrito diferentes modalidades en las que es posible utilizar las propiedades emergentes de sincronización, que se observan experimentalmente en construcciones genéticas, para el desarrollo de prototipos de computación no convencional aplicados al diseño de interacciones sónicas en sistemas bacteoelectrónicos.

Esta aproximación, de carácter marcadamente ingenieril, está enfocada en manipular tanto a los sistemas de bacterias, mediante la transformación de sus sistemas de transcripción y regulación genéticos y de sus ambientes de crecimiento mediante dispositivos de microfluídica, como a los sistemas electrónicos, en los que se coacciona a los materiales semiconductores a funcionar en estados saturados.

De esta manera la transformación tecnológica en estos sistemas híbridos de bacterias y electrónicos está direccionada al control de dichos sistemas con la finalidad, en nuestro caso, de generar salidas de carácter sonoro relevantes dentro del ámbito de las tecnologías musicales.

Aunque esta tesis no tenga como propósito el emplazar su discurso dentro de los



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

campos de análisis histórico-críticos de la ciencia, consideramos que es necesario en este punto situar los conocimientos expuestos en el capítulo anterior dentro de una línea de pensamiento feminista de reapropiación del discurso científico y técnico.

De la misma manera que Mary W. Shelley en “Frankenstein; or, The Modern Prometheus” [172] siente el temor y las inmensas posibilidades en las creaciones que hibridan la biología y las máquinas, leyendo las secciones de aplicaciones futuras y de conclusiones en gran parte de los artículos científicos que conforman el estado del arte en electromicrobiología y en biocomputación (especialmente en el artículo “Pathways to cellular supremacy in biocomputing” [121]), se percibe la misma dualidad: un recelo ante la posibilidad de que estos conocimientos y tecnologías sean apropiadas dentro de los discursos políticos y económicos capitalistas, y a la vez un maravillamiento ante las posibilidades de acceder a nuevos conocimientos y dispositivos y a nuevas formas de expresión en simbiosis con la naturaleza.

Por una parte, el conocimiento que se deslinda del capítulo anterior acentúa una visión en la que los organismos dejan de existir como objetos del conocimiento como tal para transformarse en componentes bióticos, de la misma manera en que lo son los componentes abióticos electrónicos con los que cohabitan dentro del mismo sistema, convirtiéndose en instrumentos funcionales para un procesamiento de información y pudiendo así ser enmarcados dentro un contexto análogo al de la teoría cibernética y de los sistemas de control.

En este sentido, tal y como indica Donna J. Haraway [173], las historias de origen falogocéntricas son construidas en las tecnologías literales que escriben el mundo (perpetuando la dominación del mito occidental que distingue entre las culturas oral y escrita como primitivas y civilizadas respectivamente). Así la biotecnología y la microelectrónica como nuevas tecnologías de escritura, en las que la primera escribe información sobre la materia viva y la segunda sobre los chips, tienden inherentemente a perpetuar la historia contada de quien tiene acceso a este conocimiento y tecnología, i.e. los centros académicos y las empresas tecnológicas (en muchos casos interconectados) con los recursos humanos

y materiales dispuestos a su favor.

No obstante como propone Haraway dentro del imaginario ciborg [174], las historias femeninas de la ciencia tienen como tarea la de codificar de nuevo la comunicación y la inteligencia para subvertir el mando y el control impuesto mediante la apropiación de esas herramientas de escritura. Así de esta manera:

“La política de los ciborgs es la lucha por el lenguaje y contra la comunicación perfecta, contra el código que traduce a la perfección todos los significados, el dogma central del falogocentrismo. Se debe a eso el que la política de los ciborgs insista en el ruido y sea partidaria de la polución, regodeándose en las fusiones ilegítimas de animal con máquina.”

En nuestro caso el ubicar los conocimientos que se desprenden del capítulo anterior dentro de un ámbito sonoro supone una resituación de éstos fuera de los marcos tradicionales en los que normalmente se esperaría que habitaran, así de esta manera el enfoque propuesto en el que se orientan estos conocimientos se puede considerar de carácter disidente y/o de resistencia en dos sentidos.

Primeramente, el hecho de reubicar los conocimientos, técnicas y finalmente los prototipos de los dispositivos que surgen en el campo de investigación de la bacto-electrónica dentro de un terreno de investigación artística, que incorpora una búsqueda que incluye tanto una finalidad divulgativa como estética, nos dirige hacia esa “polución”, ejemplificada por el carácter multidisciplinario de nuestra aproximación y a esa “fusión ilegítima”, en lo que se refiere a esa voluntad de no aplicar esos conocimientos y tecnologías dentro de los campos legitimados del conocimiento científico y de la industria.

Por otro lado, al enfocarnos en una modalidad sonora y de escucha, transponiendo los sistemas convencionales de adquisición y de representación de información encarnados en las modalidades visuales, tanto desde el campo de la biología, en el uso histórico del microscopio, y en el campo de la electrónica, con la pantalla como periférico totémico para la representación, nos desviamos de los modos en los que “los ojos dentro de las ciencias

tecnológicas pulverizan cualquier idea de visión pasiva”[174].

Dicho esto (y sin la pretensión de legitimarnos a través de una reapropiación del discurso feminista), en este capítulo, siguiendo en la exploración de las propiedades emergentes en los sistemas biológicos dentro del dominio *micro* de las bacterias, continuaremos buscando las maneras de entender dichos sistemas a partir de la descripción de los fenómenos sonoros y vibracionales inherentes a ellos. Así si en el capítulo anterior consideramos el uso de las propiedades emergentes de dichos sistemas para su manipulación y transformación hacia sistemas sonoros, en este capítulo vamos a adoptar una visión ya no de carácter ingenieril sino de *science as usual*<sup>1</sup>, con la finalidad de poder dilucidar cómo el sonido y la vibración pueden llegar a ser fenómenos que condicionan y estructuran el surgimiento de ciertas propiedades emergentes y de auto-organización en colonias de bacterias.

Como primera aproximación hacia estos argumentos podemos interrogarnos, a modo de pregunta de investigación, si **¿Es posible que las propiedades de organización de índole espacio-temporal y funcional que se observan durante el crecimiento en colonias de bacterias estén mediadas de alguna manera por fenómenos comunicacionales de carácter vibracional y/o sonoro?**

Así de esta manera, para empezar a responder al enfoque de esta pregunta, a lo largo de este capítulo plantearemos diferentes aproximaciones de carácter teórico entorno a los campos de estudio de la microbiología, de la física de la materia condensada y de la materia activa, como de la bioacústica y la biotremología, para después proseguir con la parte experimental de detección de emisiones acústicas en colonias de bacterias del género *Paenibacillus* en relación a las transiciones de morfotipo que experimentan a lo largo de su crecimiento. Seguido a esta parte experimental, que incluye, aparte del uso de equipo especializado de medición acústica en una cámara anecoica, la construcción y el uso de herramientas de observación y medición provenientes del campo DIY en biología, se propone

---

<sup>1</sup>Basada en las metodologías de observación sistemática, medición, experimentación, y en la formulación, análisis y modificación de una hipótesis fundamental. Expresión similar a *business as usual*, la cual hace referencia a las conductas normales de negocios a pesar de las circunstancias externas, especialmente en eventos que poseen un marcado potencial de impacto negativo.

un modelo físico para explicar el resultado de las señales obtenidas experimentalmente.

Finalmente, antes de empezar a transcurrir en el estado del arte en cuestión y en la motivación del estudio de estos microorganismos, sólo mencionar que el capítulo que se extiende a continuación forma parte de la investigación artística del proyecto *Comunicaciones Especulativas* en colaboración con el colectivo Interspecifics, junto al Keymer Lab y al Federici Lab de la P. Universidad Católica de Chile <sup>11</sup>.

### 3.1. Motivación para el Estudio de la Auto-Organización en Colonias de Bacterias

La gran variedad de patrones y de formas que existen en la naturaleza, algunas de las cuales hemos visto a lo largo de los capítulos anteriores como se manifiestan desde los dominios espaciales y temporales, han sido motivo de fascinación y de estudio en campos muy diversos del conocimiento. En algunos de estos casos sucede también que un mismo patrón se extiende ubicuamente en diferentes tipos de objetos y a partir de diferentes fenómenos pertenecientes a distintas disciplinas de estudio, como es el caso por ejemplo de la forma espiral (ver figura 3.1). Ésta aparece como un motivo repetido tanto en grabados sobre piedra, arquitectura, escultura, dentro de las artes performativas y en la literatura, como dentro del mundo natural en galaxias, huracanes, telas de araña y en hélices de proteínas por apuntar solo algunos casos.

---

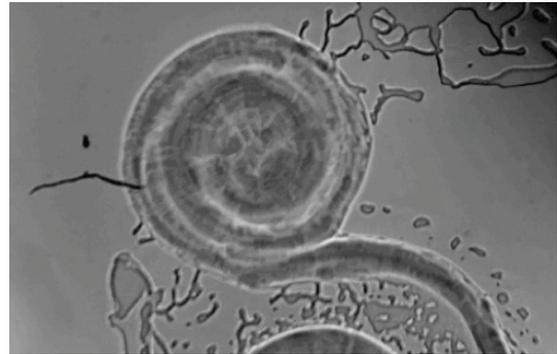
<sup>11</sup><http://interspecifics.cc/comunicacionesespeculativas/>



(a) Petroglifo sobre roca al borde de un acantilado, imagen tomada Ocotitlán.



(c) Helecho del género Polypodiaceae, imagen tomada Ocotitlán.



(b) Bacterias *Paenibacillus Vortex*, imagen tomada en el Keymer Lab con el microscopio DIY OpenScope. Éstas son un morfotipo de la especie *P. Dendritiformis* que estudiaremos más adelante.



(d) Idalid sosteniendo una caracola levógira en su mano derecha y una dextrógira en su mano izquierda.

**Figura 3.1:** Diferentes ejemplos de estructuras espirales en la naturaleza.

El hecho de observar que varios sistemas naturales provenientes de dominios diferentes comparten entre sí una misma tipología de patrón, a parte de la belleza que se desprende de esta experiencia estética, nos hace cuestionar a la vez si esta génesis distribuida es el resultado de diferentes causas y efectos o bien si es que existe un conjunto de principios subyacentes que fomentan la composición de un esquema unificado.

Dentro de los mundos abióticos existe una clase de patrones interfaciales que se generan mediante un fenómeno que se conoce como crecimiento difusivo, los cuales han sido ampliamente estudiados dentro del campo de la física de la materia condensada. Estos

patrones se observan por ejemplo en el crecimiento de copos de nieve, en la agregación de partículas por electrodeposición, en los sistemas de difusión por agregación limitada (DLA), en la solidificación de metales o bien en el crecimiento de cristales. Por otro lado, esta misma clase de patrones se observa dentro de los mundos bióticos distribuido en distintas escalas espaciales, desde las redes vasculares mas pequeñas en plantas y mamíferos o en redes neuronales, hasta las escalas macroscópicas que forman los deltas y las cuencas de los ríos (ver figura 3.3).

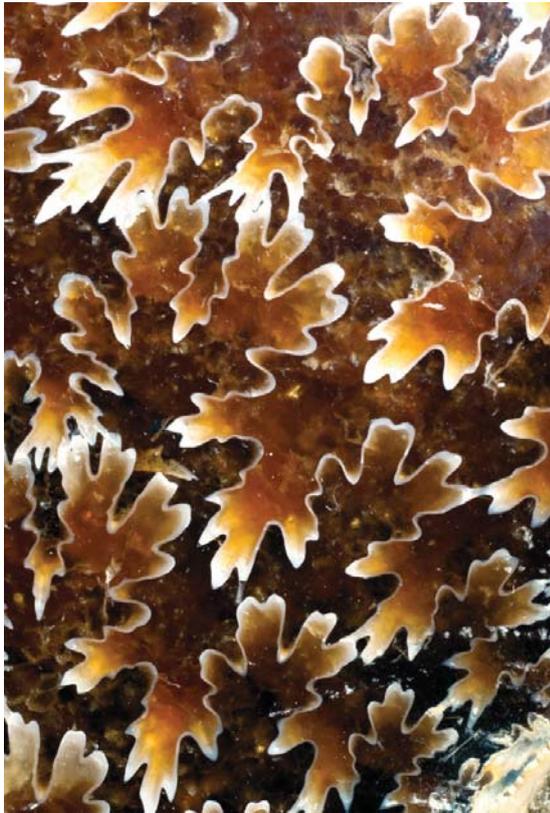


(a) Estuario del delta del río Colorado cerca de la desembocadura del mar de Cortés.

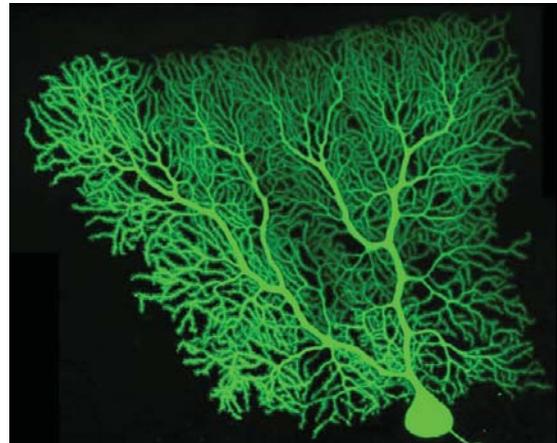


(b) Ópalo Dendrítico de San Luís Potosí, las estructuras en forma de rama normalmente son producidas por óxidos de manganeso o de hierro.

**Figura 3.2:** Diferentes ejemplos de estructuras dendríticas abióticas.



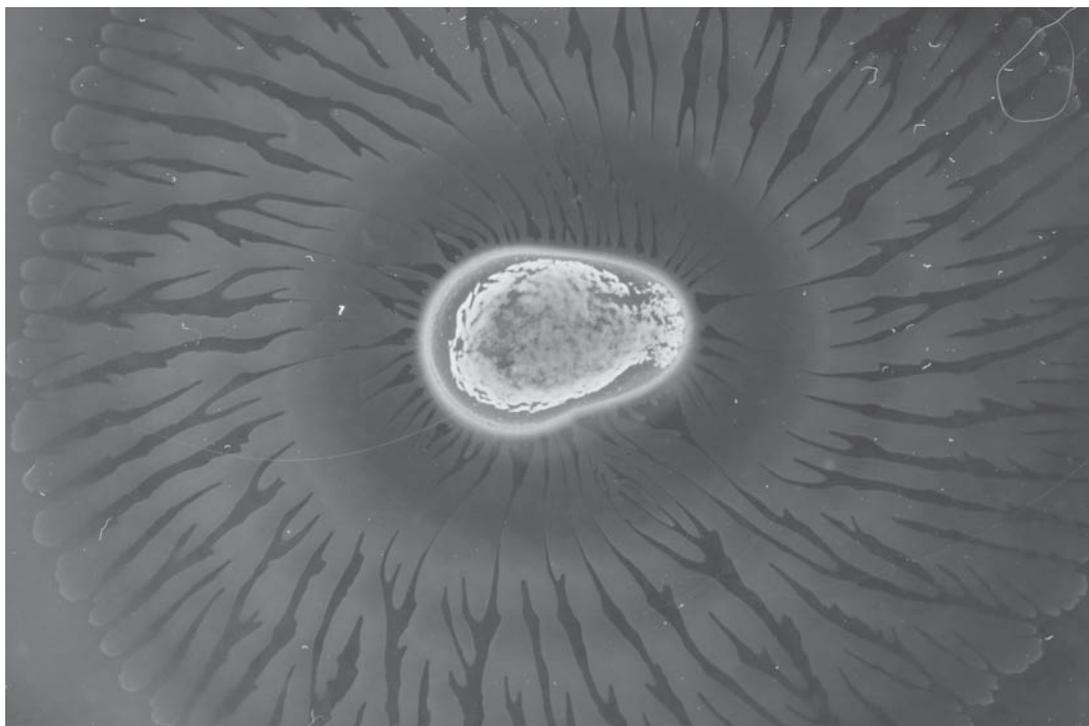
(a) Patrones de sutura dendríticos en la concha de un fósil de amonita (*Pachydiscus* sp.) de 110 millones de años de antigüedad encontrado en Baja California.



(b) Neurona de Purkinje. Estas células son una clase de neurona GABAérgica localizada en la corteza del cerebelo y en el miocardio. Estas células son algunas de las neuronas más grandes encontradas en el cerebro humano y se ramifican construyendo un intrincado y denso árbol dendrítico. Descubrimientos han mostrado que éstas liberan endocannabinoides que pueden hacer disminuir temporalmente las sinapsis excitatorias e inhibitorias.

**Figura 3.3:** Diferentes ejemplos de estructuras dendríticas bióticas.

De los ejemplos anteriores, los cuales se pueden clasificar globalmente dentro de la clase de sistemas alejados o fuera del equilibrio, el entendimiento de los sistemas biológicos es quizás uno de los más fascinantes y a la vez desafiantes. En particular dentro de los sistemas biológicos existe un género de bacterias, conocidas como *Paenibacillus* (del latín *Paene*: casi; o sea parecidas a los *Bacillus*), que bajo ciertas condiciones de cultivo y de nutrientes exhiben esta clase de patrones geométricos interfaciales, anteriormente mencionados, en forma de dendrita (ver figura 3.4).



**Figura 3.4:** *Paenibacillus Dendritiformis*, imagen tomada con el sistema *Bafle* de time-lapse macroscópico DIY.

De esta manera, la existencia de esta geometría en colonias de bacterias entraña una especie de punto de conexión entre los mundos abióticos y bióticos, ya que las bacterias siendo la primera forma de vida en la Tierra tuvieron que idear inicialmente las maneras de convertir las sustancias inorgánicas en materia viva durante la abiogénesis. Esta transición sucedió eones antes de que los humanos existieran sobre la Tierra (en la transición entre el eón Hádico y Arcaico,  $\sim 4 \cdot 10^9$  años atrás), momento en el cual las bacterias ya habían adquirido gran parte de las propiedades que se confieren cuando se intenta responder a la pregunta de ¿que es la vida?, como por ejemplo a partir de la definición de Freeman Dyson <sup>III</sup>, donde indica desde una perspectiva informacional:

“Life is defined as a material system that can acquire, store, process, and use information to organize its activities” [176].

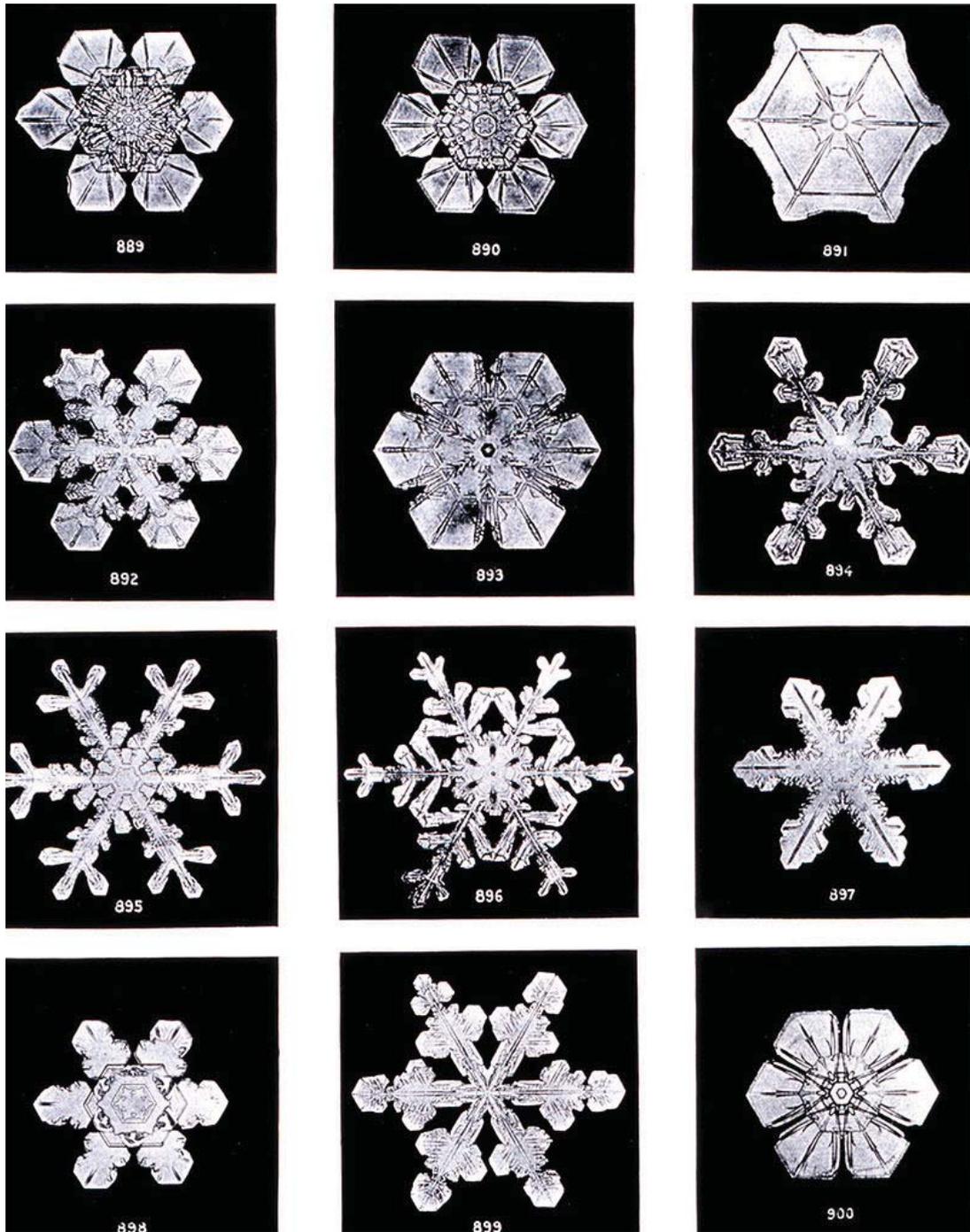
<sup>III</sup>Físico teórico y matemático, fallecido recientemente (28 de Febrero de 2020), que escribió uno de los artículos más interesantes sobre los posibles límites de la biología en el Universo titulado “Time without end: physics and biology in an open universe” [175].

Así en la próxima sección, partiendo del estudio de los patrones durante el crecimiento difusivo en sistemas no vivos, utilizaremos parte de los formalismos desarrollados dentro de la física de la materia condensada y de los sistemas termodinámicos fuera del equilibrio para su aplicación a los dominios de los sistemas vivos y en concreto a la formación de patrones en colonias de bacterias.

### 3.1.1. Patrones de Crecimiento Difusivo en Sistemas No Vivos

En el año 1611 Johannes Kepler, matemático de la corte del Imperio Romano de Rudolf II en Praga, escribió un librito de 24 páginas titulado “In De nive sexangula” (“Sobre los copos de nieve de seis ángulos”) [177], donde intenta explicar porqué los copos de nieve poseen una simetría hexagonal, después de asombrarse por la belleza de un copo de nieve sobre la solapa de su abrigo mientras cruzaba el puente Karlův en Praga, tal como escribe en la introducción de ese libro.

Aunque Kepler no es el primero en darse cuenta de la geometría de seis caras en los copos de nieve (hay documentos chinos del siglo 2 a.C. que describen este fenómeno), es el primero en unir las viejas ideas geométricas Neoplatónicas de un Universo ordenado, que refleja el diseño de Dios, con la nueva filosofía mecanicista emergente en su época, en la cual los fenómenos naturales son explicados por causas quizás ocultas o escondidas, las cuales en este texto Kepler nombra como “*facultas formatrix*”.



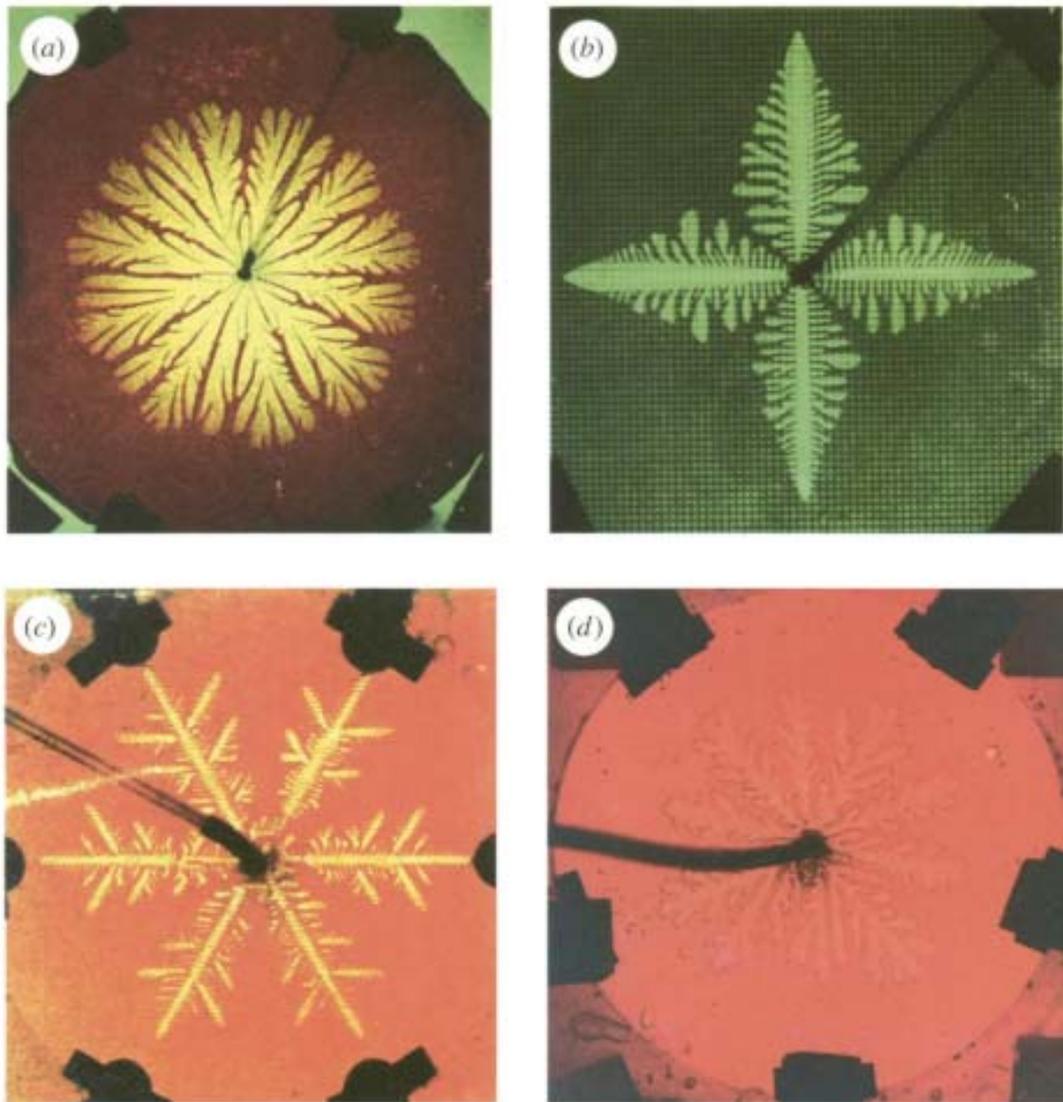
**Figura 3.5:** Cristales de nieve fotografiados por primera vez por Wilson “Snowflake” Bentley alrededor del 1902, quien en 1931 publicó el libro *Los cristales de nieve*, con más de 2.400 imágenes [178].

Así esta emergencia espontánea de patrones permaneció un misterio para los estudiosos de las ciencias naturales por varios siglos hasta que Alan Turing, el cual ya habíamos

mencionado en el capítulo 2 como pionero de la computación, propuso en el año 1952 en el artículo “The chemical basis of morphogenesis” [179] el principio de competición en la formación de patrones. Turing expuso en ese artículo que ciertos patrones evolucionarían en un sistema llevado fuera del equilibrio a partir de una competición entre varias tendencias. Uno de los ejemplos típicos de esta clase de patrones ocurre dentro del crecimiento difusivo, donde una fase termodinámica se propaga a una fase metaestable y donde existe una competición entre la tendencia difusiva por una parte y la dinámica microscópica en la interfaz por otra. En el caso de la formación de los copos de nieve esta competencia surge cuando a partir del vapor frío de agua el sólido, que representa la fase estable, se propaga hacia una fase metaestable, compuesta por vapor de agua en un estado supersaturado.

El siguiente paso histórico que se alcanzó para la comprensión de los patrones en copos de nieve fue el entendimiento de que las dinámicas microscópicas actúan como perturbaciones, las cuales se amplifican durante el proceso de difusión. A partir de ese punto quedó claro finalmente que la simetría de seis caras en el copo de nieve emana de la simetría hexagonal subyacente en el látice de hielo [180].

Esta competencia jerárquica entre los niveles *macro-micro* se muestra de una manera más obvia en el caso de los patrones generados por DLA en células de Helle-Shaw, donde entre dos placas de plexiglás que contienen una fina capa de glicerol se inyecta aire en su centro. Como podemos ver en la figura 3.6, las diferentes morfologías en la escala macroscópica se corresponden con las diferentes organizaciones impuestas en los niveles microscópicos mediante leves anisotropías en el relieve de las placas [181].



**Figura 3.6:** (a) Morfología típica para condiciones isotrópicas en una célula de Helle-Shaw, (b) Latiz cuadrado, (c) Látiz triangular, (d) Látiz cuasi-periódico [181].

A parte del equilibrio que existe entre los diferentes efectos en competencia durante los procesos de crecimiento difusivo, también se observa que este equilibrio va variando en función de como las condiciones de crecimiento cambian. Así de este modo los diferentes patrones que se observan se pueden agrupar en categorías de patrones o de formas esenciales (conocidas como morfologías), con cada una de éstas representando el efecto dominante de una determinada condición de crecimiento. Debido al hecho de que para un mismo sistema existe una variedad de condiciones posibles de crecimiento que resultan

en una misma morfología, se utiliza el término “diagrama morfológico”, en analogía al término “diagrama de fases” utilizado en el estudio de los sistemas en equilibrio [180].

Dentro de estos últimos sistemas se conoce que, para unas determinadas condiciones, la fase que se observa experimentalmente es la que minimiza la energía libre mediante el principio de mínima energía, el cual declara que para un sistema cerrado, con parámetros externos constantes, la energía interna disminuirá y se acercará a un valor mínimo en el equilibrio <sup>IV</sup>. No obstante la existencia de un principio equivalente para sistemas vivos que evolucionan en el tiempo, como es el caso de las bacterias, es una cuestión aún no del todo resuelta. Aún así, como veremos en la próxima sección, hay algunos estudios que proponen un principio de selección en los sistemas vivos a partir del cual se elige la morfología que posee una velocidad de crecimiento mayor [182].

### 3.1.2. Patrones Complejos en Colonias de Bacterias

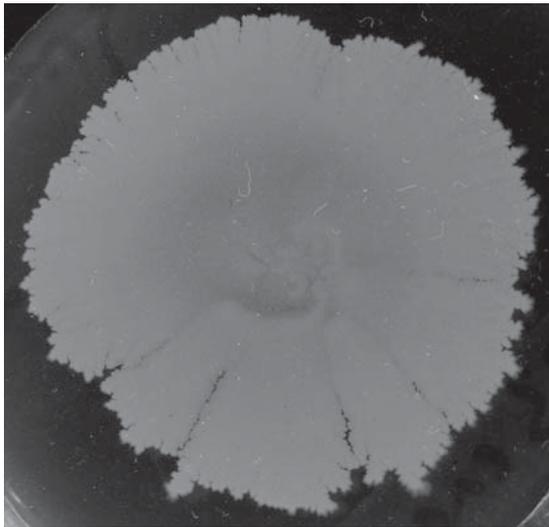
Partiendo de la analogía con los patrones difusivos en sistemas no vivos, uno esperaría encontrar la formación de patrones complejos también en colonias de bacterias. En este último caso el principio de competición para la formación de patrones viene determinado de un lado por la tasa de reproducción en un nivel celular *micro*, la cual determina la tasa de crecimiento en la colonia en un nivel *macro*, y por otro lado es influenciada por la difusión de los nutrientes hacia ésta a través del substrato [180]. De esta manera el crecimiento de la colonia de bacterias bajo ciertas condiciones tiene que ser similar al crecimiento por difusión limitada de los ejemplos en la sección anterior.

Dentro del campo de la microbiología normalmente se tiende a hacer crecer las colonias de bacterias en medios ricos en nutrientes, como por ejemplo en el medio Luria-Beltrani (LB) estandarizado desde los años 50 (el cual no deja de ser a la vez una receta muy particular de aminoácidos, vitaminas y sales). Estas condiciones propensas para el creci-

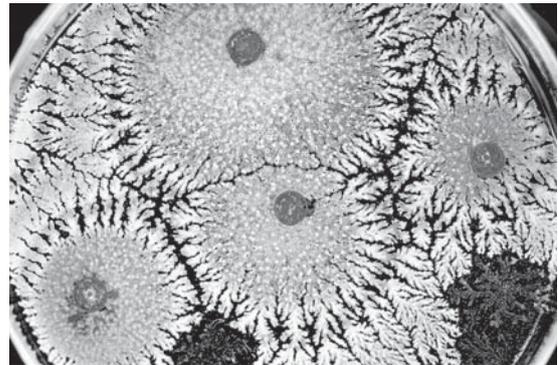
---

<sup>IV</sup>A partir de la relación de Helmholtz  $F = U - TS$  y de su representación diferencial  $dU = -pdV - SdT + \sum_i \mu_i dN_i$ , vemos que en una transición de fase la temperatura del sistema decrece y por lo tanto la entropía proporciona una contribución tal que disminuye la energía libre, hasta que el sistema decae en algún momento a un estado más ordenado.

miento de las colonias conducen normalmente a patrones compactos, a los cuales no se les confiere un interés particular respecto a su estructura espacial dentro de ciertas visiones dentro del campo de la microbiología, las cuales entienden a las colonias de bacterias como un conjunto de organismos unicelulares independientes que no interactúan entre sí. No obstante las colonias de bacterias normalmente se encuentran en ambientes naturales con diferentes condiciones ambientales, que además de ser cambiantes suelen tener una disponibilidad limitada de recursos en su entorno. De esta manera cuando se simulan estos ambientes de carácter “hostil” en el laboratorio, mediante la limitación de nutrientes y aumentando la dureza del substrato de crecimiento en platos de petri, las colonias de bacterias manifiestan patrones no uniformes reminiscentes a los patrones de crecimiento por difusión limitada en sistemas no vivos.



(a) Patrones radiales en un medio rico en peptona (8g/l) y concentración de agar suave (0.75 %).



(b) Patrones fractales en forma de rama en una placa de petri ya seca con varias inoculaciones en un medio de cultivo inicial pobre en peptona (0.05g/l) y agar intermedio (2%). Se puede observar el fenómeno de repulsión entre las distintas inoculaciones.

**Figura 3.7:** Diferentes patrones de *P. Dendritiformis* en diferentes medios de cultivo, rico y pobre respectivamente. Imágenes tomadas con el sistema Baffle DIY.

Sin embargo un paso más allá hacia la complejidad, y a diferencia de las moléculas de agua que forman los copos de nieve, las unidades básicas a partir de las cuales se forman las colonias de bacterias son sistemas vivos en sí mismos, que paralelamente a su

replicación van mutando en función del censado del ambiente y ajustando su metabolismo para finalmente perpetuar su expansión. Así de esta manera la formación de patrones a nivel de colonias se puede entender a partir de la interacción dinámica entre los niveles *micro* representados por las células bacterianas a nivel individual y los niveles *macro* de la colonia de bacterias.

Como veremos en la siguiente sección, la adaptación de las colonias de bacterias a diferentes condiciones de crecimiento, con diferentes concentraciones de nutrientes y de dureza del medio, conlleva a la generación de diferentes morfologías de crecimiento las cuales son el resultado eficiente de una autoorganización que percibimos en un nivel *macro* pero que se logra mediante un comportamiento cooperativo de las células individuales en un nivel *micro*.

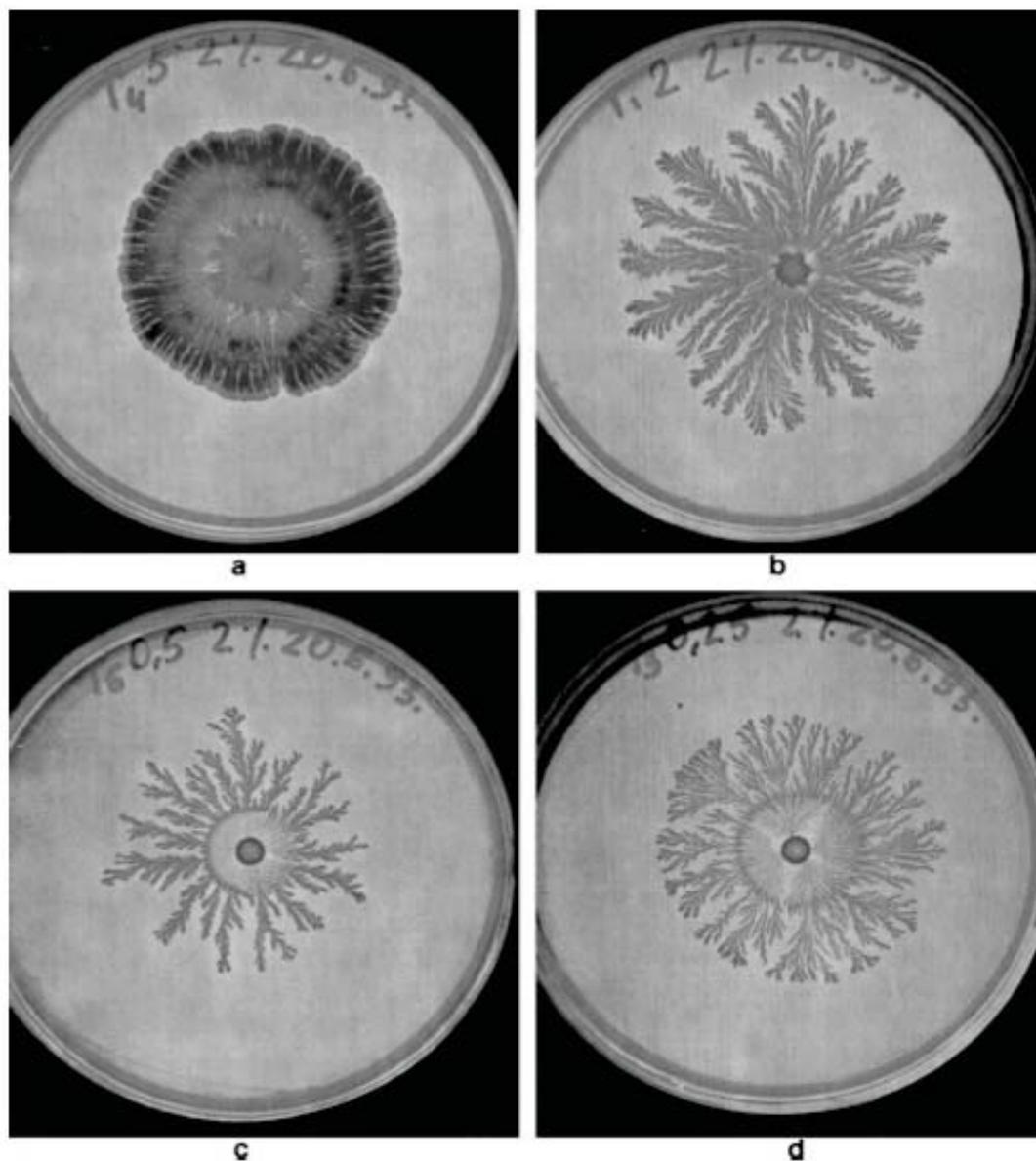
Antes de proseguir solo apuntamos en este momento que estos fenómenos cooperativos a los que nos referimos, y que de alguna manera median la comunicación entre las distintas escalas de descripción espacial, son los que intentaremos describir desde una perspectiva vibracional y sonora más adelante.

### 3.1.3. Diagramas Morfológicos en Colonias de Bacterias

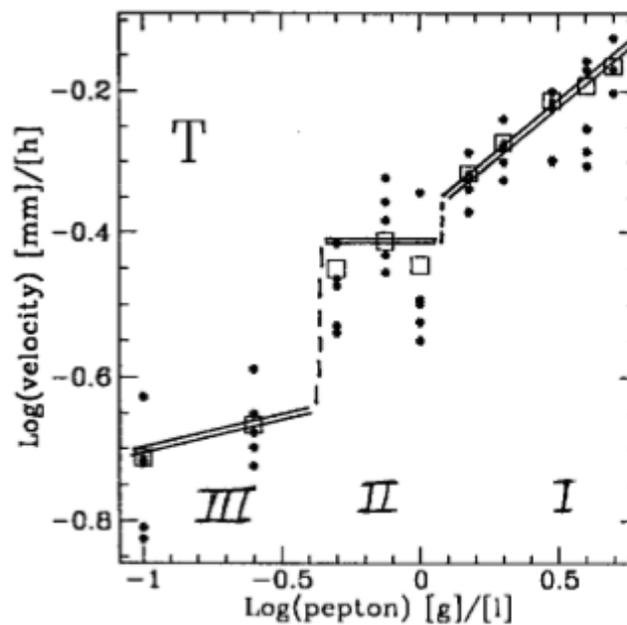
En el año 1989 un grupo japonés liderado por Matsushita, descubrió por primera vez en colonias de bacterias de *Bacillus Subtilis* crecimientos fractales en platos agar similares a los patrones de difusión por agregación limitada [183]. En esas primeras observaciones se vio como estas bacterias desarrollaban formaciones en forma de rama, con unas ramas pequeñas al lado de ramas más grandes, lo cual mostraba un indicio de que las grandes “apantallaban” de alguna manera a las más pequeñas. Experimentos posteriores del mismo grupo observaron además que dos colonias inoculadas juntas en campo de nutrientes homogéneo crecían en direcciones opuestas como si se repelieran unas a otras (ver figura 3.10)[184], y que además en el caso en que se inoculara una sola colonia en el centro de la placa de petri éstas crecían en dirección a los nutrientes situados en un extremo de la placa [185]. La observación en conjunto de estos tres fenómenos citados llevó a la conclusión de

que la morfología observada durante el crecimiento de estas bacterias era generada por un mecanismo de agregación por difusión limitada (hecho que se corroboró posteriormente en 2018 mediante simulaciones numéricas [186]).

Motivado por estas observaciones un grupo israelí, liderado por Ben-Jacob, empezó en el año 1992 a conducir experimentos para ver que tan adaptables eran estas bacterias en la presencia de una presión de selección externa en forma de limitación de nutrientes y de dureza de superficie de crecimiento [187][188]. De los patrones observados en esos experimentos vieron que éstos se podían agrupar en un número reducido de formas esenciales o morfologías, cada una representando el dominio de un efecto subyacente determinado. A partir de la definición del concepto de diagrama de morfología que muestra este tipo de agrupación de formas en función de los nutrientes y de la dureza del agar, infirieron la existencia de un principio de selección de la morfología, en el cual la colonia de bacterias escoge para cada condición de crecimiento la morfología que crece más rápido. Para demostrar esta correlación entre morfología y velocidad en esos experimentos midieron la velocidad de crecimiento para diferentes morfologías (en el punto en el que la colonia se encuentra en la mitad de la placa de petri), observando para determinadas concentraciones de nutrientes tres regímenes de velocidades correspondientes a tres morfologías diferentes (ver figuras 3.8, 3.9).

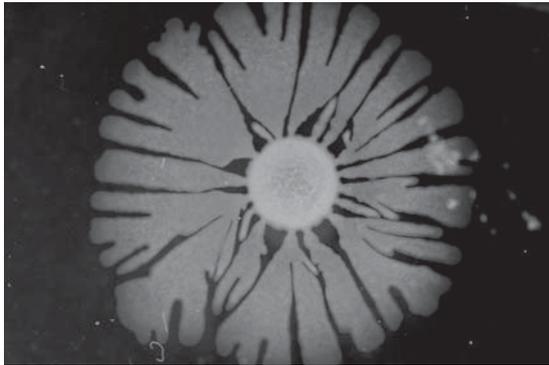


**Figura 3.8:** Ejemplos de crecimiento de los estudios de Ben-Jacob [189] (a) Crecimiento compacto a 12g/l de peptona y 1.75 % de agar (b) Dedos densos para 3g/l de peptona y 2 % de agar (c) Ramificación fractal para 1g/l de peptona y 1.75 % de agar (d) Ramificación de ramas finas para 0.1g/l de peptona y 1.75 % de agar.

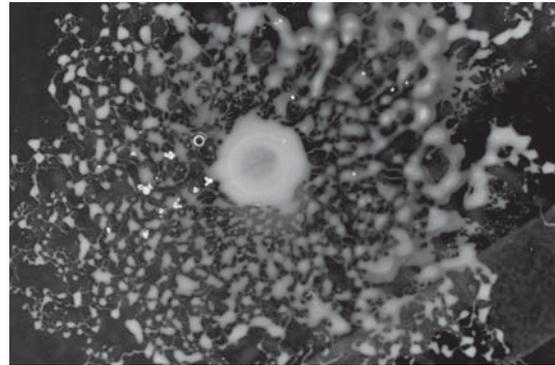


**Figura 3.9:** Velocidad de crecimiento en función de la concentración de peptona [189]. Los regímenes I, II, III corresponden a los patrones de la figura 3.8 (a), (b-c) y (d) respectivamente. La correlación entre velocidad y patrón indica la existencia de un principio de selección de morfología que determina que la morfología seleccionada por la colonia.

De estos experimentos iniciales con las bacterias *Bacillus Subtilis*, las cuales no eran motiles en agar duro, este grupo aisló una nueva especie de bacteria, la cual nombraron como *Paenibacillus Dendritiformis* [190]. Esta nueva especie de bacteria, que si es motil en condiciones de agar duro, exhibe como hemos visto varios tipos de patrones ramificados en función de sus condiciones de crecimiento (ver figura 3.8). Este modo de ramificación, el cual se ha observado que es heredable y transferible a través de crecimientos con células individuales, se refiere en los estudios de Ben-Jacob como morfotipo  $\mathcal{T}$  (proveniente de *tip-splitting*). Además de este morfotipo  $\mathcal{T}$  existe otro morfotipo perteneciente a esta misma especie de bacterias y que se refiere como morfotipo  $\mathcal{C}$  (*chiral*), en referencia a los patrones quirales y de giro que exhiben sus ramas.



(a) Morfotipo  $\mathcal{T}$  en condiciones de peptona de 2.5 g/l y de 0.5 % de agar.



(b) Morfotipo  $\mathcal{C}$  en condiciones de peptona de 1 g/l y de 1 % de agar.

**Figura 3.10:** Diferentes morfotipos de *P. Dendritiformis* observados a través del sistema Baffle DIY.

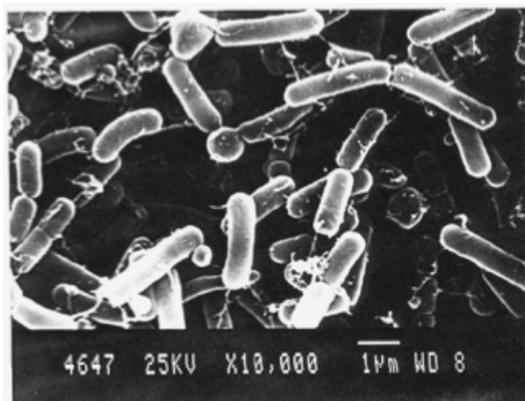
En la próxima sección ahondaremos en el estudio de los morfotipos  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  para introducir un fenómeno de transición espontánea entre patrones, el cual se observa en estos dos morfotipos durante su crecimiento. En este punto solo avanzamos que precisamente este fenómeno que sucede para determinadas condiciones de crecimiento en las colonias de bacterias *P. Dendritiformis* es el que nosotros estudiaremos más adelante desde el punto de vista sonoro y acústico y a través de los experimentos de mediciones acústicas.

### 3.1.4. Quiralidad y Transiciones de Morfotipo $\mathcal{T} \rightleftharpoons \mathcal{C}$

Profundizando en los mecanismos de crecimiento de las bacterias *P. Dendritiformis*, se observa bajo el microscopio que sus células se mueven en un modo parecido al de un caminante aleatorio dentro de un fluido [191]. Este fluido precisamente parece ser excretado por las células durante su crecimiento para facilitar su movimiento en forma de “nado” y se le denomina comúnmente como “fluido lubricante extracelular” (EWT, *extracellular wetting fluid*). En las observaciones microscópicas también se observa como las células en las partes más exteriores de la colonia son más activas que las del centro, donde a veces no se mueven o bien se observa que esporulan [191].

Aunque ambos morfotipos  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  sean dos variantes de la misma especie y tengan un

99 % de similitud en su secuenciación [190], claramente muestran diferentes patrones a nivel de colonia. De la misma manera, observados bajo un microscopio electrónico se percibe como las células provenientes del morfotipo  $\mathcal{C}$  son más alargadas que las del morfotipo  $\mathcal{T}$  y que además las del morfotipo  $\mathcal{C}$  parecen estar correlacionadas en su orientación (ver figura 3.11) [192]. Adicionalmente estas observaciones bajo microscopio electrónico indican que la estructura quiral del morfotipo  $\mathcal{C}$  no proviene de una rotación en la membrana celular [192]. Así de esta manera, si la estructura morfológica de la colonia de bacterias del morfotipo  $\mathcal{C}$  no proviene de la geometría intrínseca de la membrana celular en un nivel *micro*, uno se puede preguntar que causa esta quiralidad y si existe una relación causal entre la elongación de las células y la formación de patrones quirales.



(a) Células del morfotipo  $\mathcal{T}$ , las barras cilíndricas son las bacterias y las esferas las esporas.



(b) Células del morfotipo  $\mathcal{C}$ . Se puede observar su estructura más filamentosas y alineadas respecto al morfotipo  $\mathcal{T}$ .

**Figura 3.11:** Observaciones en microscopio electrónico de los morfotipos  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  [189].

La quiralidad que se observa en las colonias del morfotipo  $\mathcal{C}$  es un fenómeno que se comparte en una diversidad de estructuras que van desde las escalas subatómicas, en las propiedades del spin en las partículas elementales, hasta las escalas cosmológicas, en la rotación de los filamentos de las galaxias. Aunque la simetría quiral sea un tema fascinante, y que además juega un rol fundamental en la evolución de los sistemas vivos y en concreto en la transición abiogénica<sup>v</sup>, sólo mencionar aquí que las bacterias muestran varias

<sup>v</sup>Se especula que un requerimiento mínimo para la existencia del tipo de vida terrestre es la emer-

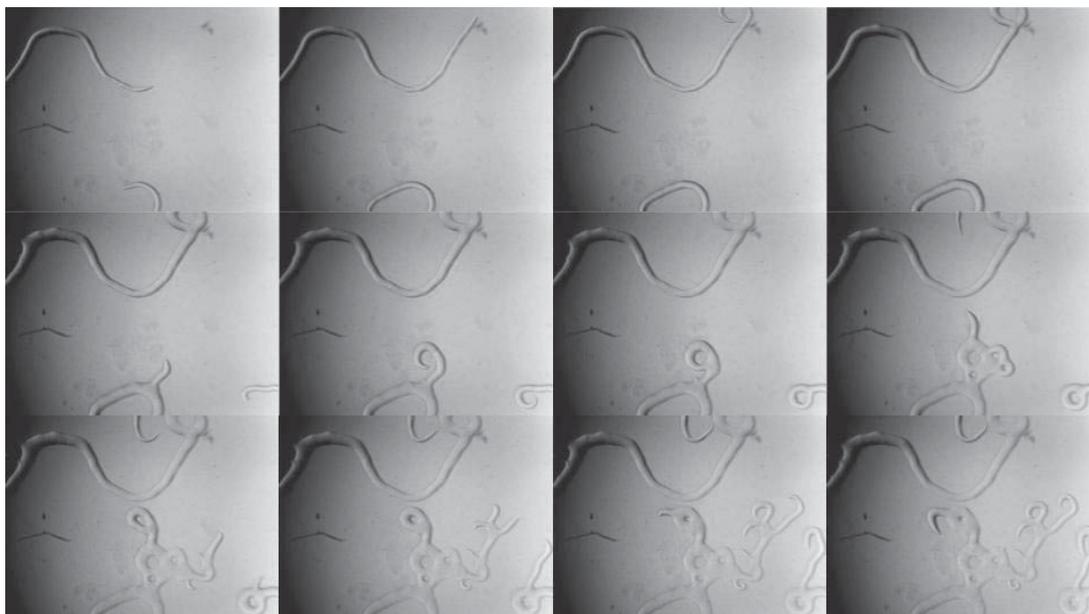
propiedades quirales a nivel fenotípico. Por ejemplo se ha observado como células de *B. Subtilis* pueden crecer en hélices y que sus células forman cadenas que están entrelazadas las unas con las otras. Como hemos apuntado, en el caso de *P. Dendritiformis* la quiralidad no se observa a un nivel celular individual sino a partir del movimiento coordinado de nado en el conjunto de las células y por lo tanto debe existir otro mecanismo que no es una consecuencia de la geometría inherente a la célula. Como posibles explicaciones de carácter general se han propuesto mecanismos de control de la quiralidad basados en las propiedades flagelares [194][195], y de interacción flagelar acoplada con las orientaciones entre células [196].

En el morfotipo  $\mathcal{C}$  por debajo de una concentración de agar de  $0,5g/l$  se observan patrones de crecimiento compactos mientras que para concentraciones en el rango de  $0,5g/l$  a  $1g/l$  se observan patrones más complejos, con ramas quirales tanto levóginas como dextróginas. En este caso cada rama mantiene su forma durante su crecimiento mientras va avanzando, e incluso aumentando ligeramente el diámetro de la rama (creando una especie de plasmodios que transportan materia similares a los de las amebas), hasta que llega un punto en el que se produce un giro colectivo en la rama individual. En este momento, de la rama principal surgen otras ramas en forma de espina, y en los casos cuando estas subramas se cierran sobre si mismas se observa como las células van expandiéndose a partir de una especie red, formada por lo que se podría denominar como *loops* autoreplicantes (a la manera de los autómatas celulares *Langton's loops*<sup>VI</sup>) (para entenderlo mejor, ver la figura 3.12 y 3.13).

---

gencia natural de monómeros quirales, de tal manera que los ciclos de vida puedan ser iniciados en una complejidad baja (a partir de la estrategia de “diversidad en la uniformidad”). Si la amplificación de una disrupción en la quiralidad abiótica es un requerimiento, entonces también lo es una asimetría estable a gran escala planetaria que actuó como condicionante para la emergencia de la vida. (Para más detalles sobre los orígenes de la quiralidad en sistemas vivos se puede consultar el libro de exobiología [193]).

<sup>VI</sup>Estos *loops* son una “especie” de vida artificial dentro de los sistemas autómatas celulares y fueron creados por Christopher Langton [197]. Consisten en un *loop* de células que contienen información genética, los cuales fluyen continuamente alrededor del *loop* y fuera de éste en ramas o pseudopodios, los cuales con el tiempo engendran nuevos *loops*.

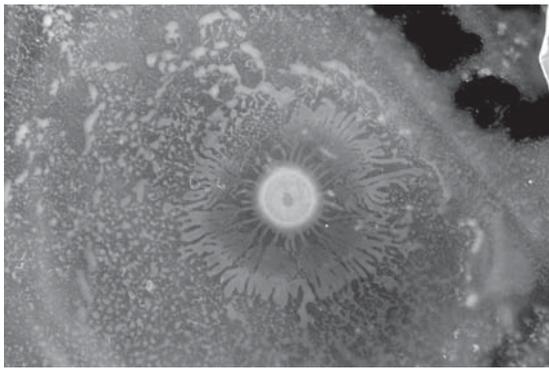


**Figura 3.12:** Fotogramas del *time-lapse* tomado durante aproximadamente 2h del morfotipo  $\mathcal{C}$  crecido en medio de cultivo MH al 1%. Imágenes tomadas con el OpenScope en el KeymerLab.

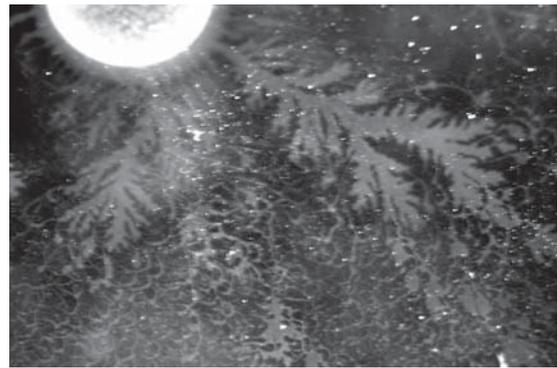


**Figura 3.13:** Imagen del mismo cultivo de la foto anterior después de aproximadamente 4h. Se puede observar los patrones circulares a través de los cuales la colonia va expandiéndose en forma de zarza.

Estos dos morfotipos  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  que hemos expuesto son heredables y pueden coexistir en un rango de condiciones de crecimiento, no obstante cuando se crecen colonias del morfotipo  $\mathcal{T}$  en condiciones de agar suave (alrededor del 1%) se observa ocasionalmente un fenómeno espontáneo de transición al morfotipo  $\mathcal{C}$  en ciertas ramas de la colonia  $\mathcal{T}$ , tal y como podemos observar en la figura 3.14. Aunque la transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  es la más frecuente también se observa a veces la transición inversa  $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{T}$  para condiciones de agar más duras y con más nutrientes. En ambos casos el nuevo patrón seleccionado es el que maximiza la tasa de expansión de la colonia a nivel global, hecho que apunta a que la manipulación y selección del morfotipo por parte de la colonia se activa para alcanzar una mayor adaptabilidad [198].



(a) Transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  en 0,5% de agar. Se observa como en la parte superior del punto de inoculación hay un grupo de células que antes de que se logre asentar un patrón de tipo rama, como en las otras partes circundantes, ya empiezan a desarrollar patrones del morfotipo  $\mathcal{C}$  mas disgregados.



(b) Transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  en 1% de agar. Se observa como de la rama fractal se desprenden filamentos del morfotipo  $\mathcal{C}$  con un patrón de giro marcadamente quiral. Ben-Jacob[199] sugiere que dentro de la colonia hay una mutación continua entre células  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  hasta que en la transición una se sobreexpresa con respecto a la otra.

**Figura 3.14:** Transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  a diferentes durezas de agar en diferentes cultivos iniciales del morfotipo  $\mathcal{T}$ . Imágenes obtenidas con el sistema *Bafl*e DIY.

Estudios basados en simulaciones de modelos indican que estas transiciones de morfotipo no son transiciones fenotípicas espontáneas a nivel de célula individual sino que éstas son de carácter genético autocatalítico y/o sincronizado [199]. Por autocatalítico

se entiende que las células del morfotipo  $\mathcal{C}$  emiten moléculas de señalización que pueden desencadenar transiciones  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  en otras células. Por sincronizado se entiende que justo antes de la transición, las células del morfotipo  $\mathcal{T}$  emiten moléculas de señalización que pueden desencadenar esta transición. En ambos casos el mecanismo comunicacional subyacente que se propone como causante de la transición de morfotipo, y que ayuda a las células a decidir entre los patrones  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$ , es de carácter químico, aún así este mecanismo no se ha corroborado a nivel experimental y sigue habiendo varias preguntas no resueltas de cómo la presión que experimenta la colonia a un nivel *macro* puede alcanzar a los niveles inferiores e interactuar con los cambios genéticos de las células a nivel individual.

En este punto parece un poco más claro que tanto la formación de patrones como las transiciones de morfotipo que hemos observado requieren de un modo de comunicación celular organizado y de un comportamiento cooperativo en una escala global que se construye a partir de un conjunto de células a nivel individual. Los mecanismos que se investigan para explicar esta clase de comunicación y de coordinación de actividades entre las bacterias están enfocados normalmente a descripciones a partir fenómenos de señalización bioquímicos (como por ejemplo señales quemotácticas, de *quorum sensing* o de intercambio de plásmidos [189]) que o bien se difunden en el medio extracelular o bien se mantienen asociadas a las células. No obstante existen otras líneas de investigación en microbiología que se desvían del estudio de esta clase de mecanismos de comunicación para centrarse en fenómenos de naturaleza física, como por ejemplo a través del sonido y la vibración mecánica, como veremos más adelante.

### **3.1.5. Comunicaciones Bioquímicas y Físicas en Bacterias**

Hay del orden de  $10^{30}$  bacterias en la Tierra y éstas habitan en colonias del orden de  $10^9 - 10^{13}$  células individuales, las cuales al actuar conjuntamente y de manera coordinada estructuran lo que se puede considerar como una especie de organismo multicelular, o de comunidad social, con una elevada plasticidad y adaptabilidad que resulta útil ante las diversas condiciones de crecimiento que pueden encontrar en los múltiples ambientes

naturales que habitan<sup>vii</sup>.

En este balance entre la individualidad de las células y la sociabilidad de la colonia se sabe que las bacterias utilizan un extenso repertorio de agentes bioquímicos para su comunicación [200], además cada bacteria posee mecanismos de señalamiento intracelular que involucran redes de transducción de señales [201] y de lenguaje genético[202]. Estos mecanismos de comunicación bioquímica, se pueden entender a grandes rasgos como aspectos de una comunicación lingüística en la cual existe una interpretación propia y compartida de señales químicas, intercambio de mensajes químicos (semánticos) y de diálogos (pragmáticos) [203]. Esta comunicación lingüística permite a las colonias desarrollar una identidad de grupo, reconocer la identidad de otras colonias, desarrollar una memoria colectiva que les permite aprender de la experiencia y mejorar e incluso involucrarse en tomas de decisiones a nivel grupal (como en el caso de la esporulación o en el ejemplo que hemos analizado, en el cual pueden escoger entre un morfotipo  $\mathcal{T}$  o  $\mathcal{C}$ ), conductas que al fin y al cabo pueden encajar dentro de lo que se conoce como una inteligencia social en organismos vivos [203].

Más allá de estos mecanismos pertenecientes a los dominios químicos, hay evidencia experimental que apunta que los microorganismos, tanto procariontes como eucariontes, pueden generar y responder a señales físicas, tales como ondas de sonido, radiación electromagnética o corrientes eléctricas [204]. Esta rama de investigación alrededor de los señalamientos no químicos, que se remonta a los estudios pioneros de Gurwitsch en los años 1920<sup>viii</sup>, ha recibido una atención muy limitada dentro del campo de la microbiología

---

<sup>vii</sup>Aquí resulta interesante hacer un cálculo de órdenes de magnitud, burdo, con los datos anteriores. Si consideramos que la superficie de la Tierra  $S = 4\pi(6 \cdot 10^9 m)^2$ , y que las bacterias y las colonias están distribuidas homogéneamente en un látiz, encontramos que la distancia de separación media entre bacterias en la Tierra es  $\sim 5 \cdot 10^{-8} m$ , menor al tamaño de éstas  $\sim 5 \cdot 10^{-6} m$  (lo cual indicaría que habitan amontonadas entre si en biofilms), y si consideramos el número de colonias, encontramos que éstas están separadas aproximadamente cada  $500 m$ . No obstante este cálculo pierde perspectiva si consideramos como estimación que en cada cuerpo humano existen 100 trillones de células bacterianas, que somos 7 billones de humanos en la Tierra, y que por ejemplo tan sólo la longitud de un intestino, donde habita gran parte del microbioma, es de aproximadamente  $7 m$ .

<sup>viii</sup>Gurwitsch realizó más de 200 experimentos revelando que cuando se dirige la punta de una raíz de cebolla (inductor) hacia otra raíz de cebolla (receptor), ambas separadas por un cristal de cuarzo, se observa como la raíz del inductor muestra un incremento en la tasa de mitosis de un 20 – 25 %. Ya que el efecto no está presente cuando se utiliza un cristal opaco ultravioleta, se concluyó que la radiación e.m.

a pesar de sus múltiples evidencias experimentales, quizá por la controversia que generan algunas de sus hipótesis. No obstante cada vez hay más estudios que apuntan hacia nuevos mecanismos de señalización entre células de carácter físico, como por ejemplo en la comunicación a través de biofotones [206][207], la comunicación electrónica [208][209][204][153] y a través de campos eléctricos [210][211] o la comunicación a través del sonido [212][213].

Precisamente estos dos últimos artículos citados, que abordan la posibilidad de comunicación mediante sonido en colonias de bacterias a través de su emisión y su respuesta a éste, son la referencia y el punto de partida a partir del cual hipotetizamos que las transiciones de morfotipo entre las morfologías  $\mathcal{T}$  y  $\mathcal{C}$  en las colonias de bacterias *P. Dendritiformis* pueden estar mediadas por mecanismos sonoros y/o vibracionales. Así, para ir entrando en los detalles particulares de nuestra hipótesis de investigación, en el próximo apartado, aparte de analizar estos dos artículos que nos van a servir como marco de referencia, desarrollaremos el marco teórico, centrado en el campo de estudio de la bioacústica y la biotremología, para pasar después al desarrollo de la parte experimental de medición de emisiones acústicas y al análisis de los datos en cuestión, para ya finalmente concluir con la propuesta de un modelo mecánico con la intención de explicar los resultados obtenidos.

## 3.2. Comunicaciones Acústicas y Vibracionales

Antes de entrar a describir los posibles mecanismos que pueden estar involucrados en la generación y recepción de sonido en el caso específico de colonias de bacterias es conveniente empezar con una diferenciación entre los conceptos de sonido y de vibración desde una perspectiva biológica más amplia.

Tal como hemos visto en algunos ejemplos en el capítulo introductorio (ver 1.3), hay ciertos animales que utilizan tanto mecanismos sonoros (grillos, pájaros, Lava (mi perra que ahora está ladrando)...) como mecanismos vibratorios (elefantes, ranas, arañas, in-  

---

era la responsable de este aumento en la división celular. Gurwitsch acuñó esta radiación como “radiación mitogénica” [205].

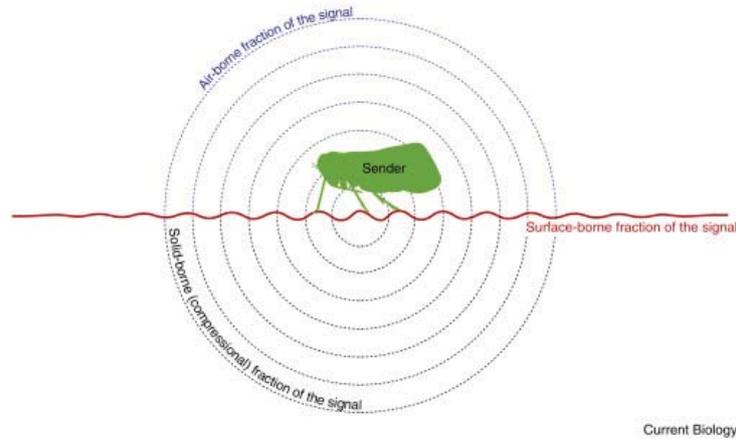
sectos,...) para finalidades comunicativas. El sonido y la vibración comparten puntos en común ya que ambos se propagan a través de un medio mediante ondas mecánicas, lo que basándonos en la terminología física enmarca estas ondas como acústicas o vibracionales respectivamente. Ambos fenómenos están muy relacionados entre sí, sin embargo existen diferencias. Así la disciplina que estudia la propagación de ondas de sonido mecánicas en los dominios biológicos se denomina bioacústica, mientras que la disciplina que estudia la propagación de ondas mecánicas de vibración no longitudinales se denomina biotremología [214].

Desde una definición común dentro de la física se entiende que el sonido se transporta a través de ondas de compresión (longitudinales), también conocidas como *P-waves* o ondas de presión, y se detecta mediante receptores de presión o de diferencia de presión, también conocidos como oídos. Ya sea que el medio a través del cual se propaga el sonido sea la atmósfera (gas) o la hidrosfera (líquido), el estímulo físico es la misma forma de onda que detecta un determinado animal en su oído. En el caso que existan ondas longitudinales viajando a través de la litosfera (sólido) éstas podrían estimular alguna especie de oído en un animal parcial o estrictamente subterráneo<sup>ix</sup>. Igualmente la energía que contienen las vibraciones viajando a través de un medio se puede transmitir a otro medio.

Por otro lado, una fuente vibratoria que emite ondas mecánicas de señalamiento crea simultáneamente componentes en el aire y en un substrato que, aunque provengan de la misma fuente, siguen caminos diferentes no sólo en el ambiente. Así el sonido en el aire viaja a través de un medio relativamente homogéneo, mientras que en los substratos naturales, normalmente inhomogéneos y con propiedades físicas variantes, las señales vibratorias están más limitadas debido a fenómenos de amortiguación y degradación.

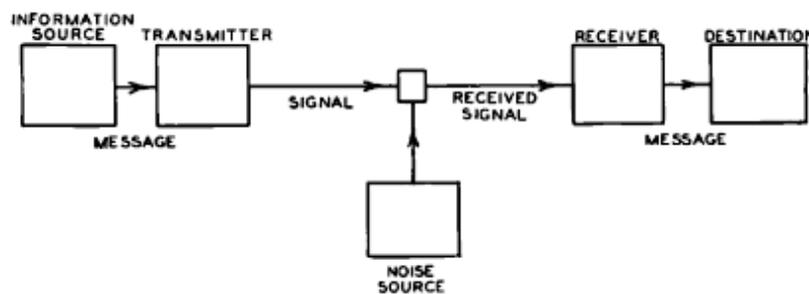
---

<sup>ix</sup>Se puede pensar aquí en los animales subterráneos tales como las lombrices, las hormigas o los topes, y más especulativamente en los animales “entumbados” (*toad in the hole*).



**Figura 3.15:** Ejemplo de formas de onda mecánicas emitidas por un insecto en un superficie . La señal del emisor (verde) se propaga en tres fracciones: en el aire (azul, onda longitudinal) en el substrato (rojo, onda no longitudinal) y dentro de éste(negro, onda longitudinal) [214].

Más allá de la generación de las ondas sonoras o vibracionales, en nuestra investigación nos interesa el proceso global de comunicación que se conforma también mediante otros elementos. Así utilizando el formalismo informacional de Shannon, vemos que el espacio activo de comunicación de señales consiste en: (i) una señal  $X(f, T)$  generada en una fuente  $S$  utilizando un transmisor  $T$ ; (ii) su transmisión a través de un medio (gas, fluido, sólido) determinado por la función de transferencia  $H_{XY}(f, T)$ ; (iii) el nivel de ruido de fondo  $N$  y (iv) la respuesta  $Y(f, T)$  percibida en el receptor  $R$ , con un cierto límite de sensibilidad, antes de que alcance a su destino  $D$ .



**Figura 3.16:** Figura original del paper “A Mathematical Theory of Communication” de Shannon, en el cual se muestra el diagrama de comunicación que va desde una fuente a un destinatario.

Resumidamente, el fenómeno básico de comunicación involucra la transferencia intencional de algún tipo de información o señal que beneficia en algún sentido tanto al emisor como al receptor. El flujo de información entre especies (o entre individuos dentro de la misma especie) se fundamenta en los mecanismos que tiene el emisor para codificar esta información y los mecanismos del receptor para decodificarla. Precisamente esta relación de cómo se empaqueta esta información (codificación) y de cómo se traduce (decodificación), determina la salida en una interacción comunicativa. Así cualquier intercambio de información entre organismos vivos, irrespectivamente de su nivel de organización biológico, se puede considerar comunicación, y por lo tanto esta comunicación es ubicua en muchos sistemas aunque históricamente se ha centrado en el dominio de los animales.

Finalmente tanto este formalismo comunicacional como esta distinción conceptual entre sonido y vibración, aparentemente trivial, nos servirá a lo largo de este apartado para delimitar los modos de transferencia de señales comunicacionales, tanto sonoras como vibratorias, durante el estudio de las emisiones acústicas en colonias de bacterias, ya que éstas, como veremos más adelante, son una fuente de emisión de ondas mecánicas que se pueden propagar tanto en el aire, como dentro del biofilm que forman cuando se estructuran como colonia, o en el medio de cultivo semisólido y viscoelástico de agar dentro de las placas de petri.

### **3.2.1. Análisis de los Estudios de Emisión y Respuesta Sonora en Colonias de Bacterias**

Como apuntábamos en la sección anterior, históricamente los procesos de comunicación se han centrado en estudios con animales, probablemente debido a que la mediación e interacción de señales en éstos involucra tanto mecanismos audibles, a un volumen relativamente alto, como movimientos fácilmente visibles en sus partes del cuerpo, lo cual facilita lógicamente a que se les preste más atención. En el reino de las plantas por ejemplo, la noción de comunicación ha sido una cuestión ampliamente discutida ya que

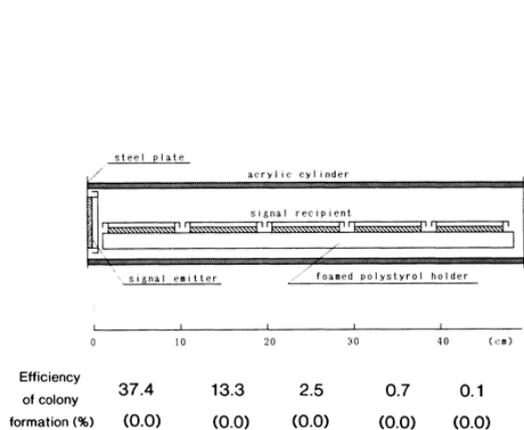
el intercambio de información en éstas se entendía originalmente que involucraba señales, i.e. características presentes en el ambiente que no han sido formadas a partir de una selección natural para transportar un significado específico a receptores intencionales, y no un proceso de comunicación estrictamente hablando, i.e. características que han evolucionado para cumplir un rol específico [215]. No obstante esta visión Aristotélica, en la que las plantas se perciben como organismos parecidos a autómatas pasivos e insensibles [216], ha ido cambiando a lo largo de estas dos últimas décadas a partir de estudios que indican que éstas utilizan un repertorio muy extenso de mecanismos químicos, de contacto, o de luz para transmitir, recibir y evaluar información *intra e inter* específicamente. Dentro de estos estudios contemporáneos hay algunos que se centran específicamente en el estudio bioacústico y biotremológico, analizando cómo la habilidad de censar sonido y vibraciones conforma una modalidad sensorial dentro de una filogénesis para relacionarse tanto entre ellas como con su ambiente mediante la generación de sonido y mediante su respuesta a éste (para un artículo de revisión extenso se puede consultar “Green symphonies: a call for studies on acoustic communication in plants” [215]).

De la misma manera que la investigación de los procesos comunicacionales mediados por fenómenos acústicos y vibratorios ha ido poco a poco tomando interés dentro del campo de estudio de la botánica, algo parecido ha sucedido dentro del campo de estudio de la microbiología. Por una parte el análisis de los sistemas sensoriales a partir de la filogenia de los organismos plantea que los sistemas receptores y de transducción de señal mecánicos forman parte de los mecanismos más ancestrales de censado y señalamiento en los organismos vivos [217]. Aunque existen varias investigaciones que se enfocan en el estudio de las propiedades mecánicas de las bacterias (tanto a nivel individual como de colectividad en biofilms) a partir del estudio de sus movimientos en superficies, de las fuerzas hidrodinámicas, de las fuerzas adhesivas, de la reología con sus ambientes y de las reglas de transporte en relación a nutrientes y a moléculas de señalización (para un artículo de revisión extenso consultar “The Mechanical World of Bacteria” [218]), muy pocos se han dedicado a investigar las posibles implicaciones comunicacionales de carácter

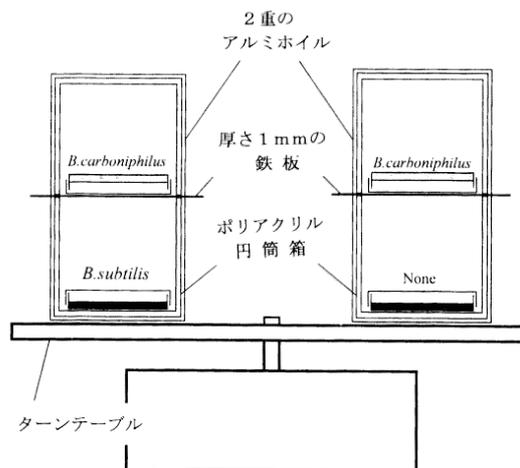
acústico y vibratorio dentro de esta clase de fenómenos mecánicos.

No obstante, el primer indicio de la habilidad de las bacterias de comunicarse a través de sonidos se obtuvo a partir de las observaciones de un grupo de investigación japonés, liderado por Matsushashi en el año 1998, en el que ondas de sonido estimulaban el crecimiento de *Bacillus Carboniphilus* bajo condiciones de estrés [213]. Aunque estas bacterias no pueden crecer cuando se inoculan en cultivos bajo condiciones de temperatura altas o en concentraciones elevadas de sal en su medio de cultivo, el crecimiento en estas condiciones desfavorables se puede estimular a partir del uso de capas densas de células vecinas tanto homólogas como heterólogas [212] (conocidas como capas de alimentación, *feeding layers* o *nursing layers* [219]). Ante este fenómeno, en el que capas de células de *B. Subtilis* se utilizan para fomentar el crecimiento en células vecinas de *B. Carboniphilus*, se suponía inicialmente que ciertos químicos jugaban un rol importante a modo de señalización entre ambos cultivos. No obstante en estos experimentos los investigadores lograron el crecimiento en *B. Carboniphilus* aún en el caso en que las capas de alimentación vecinas de *B. Subtilis* estuvieran separadas físicamente e incluso en el caso que esta separación estuviera mediada por una barrera de hierro de 1mm de grosor, evitando así la propagación y el intercambio de sustancias volátiles (ver figura 3.17)[212]. Más allá de este resultado estos investigadores en otros experimentos indujeron el crecimiento de células bajo condiciones no permisivas mediante el estímulo de ciertas frecuencias sonoras reproducidas a través de un altavoz externo e incluyendo en el medio materiales como grafito o carbón activado, elementos en los que se conoce que hay una transducción de radiación electromagnética externa a sonido (ver figura 3.18)[212]. Así ambos experimentos sugirieron finalmente que la señal de estimulación de crecimiento era de carácter físico y posiblemente sonora. Aunque en mediciones acústicas posteriores observaron que no se detectaban emisiones de las células de *B. Carboniphilus* ni de otras bacterias o levaduras, si se detectaron emisiones de las capas de células vecinas en *B. Subtilis*. En este caso el espectro de frecuencias mostraba tres picos que correspondían a las frecuencias que estimulaban el crecimiento de *B. Carboniphilus* mediante el sonido emitido por el alta-

voz externo (ver figura 3.19)[213]. Así finalmente el hecho de observar que las frecuencias que estimulan el crecimiento correspondían a las mismas que se detectaban en la emisión acústica en las capas de alimentación de las células vecinas, hizo pensar en un posible mecanismo de señalización entre bacterias de naturaleza sonora.

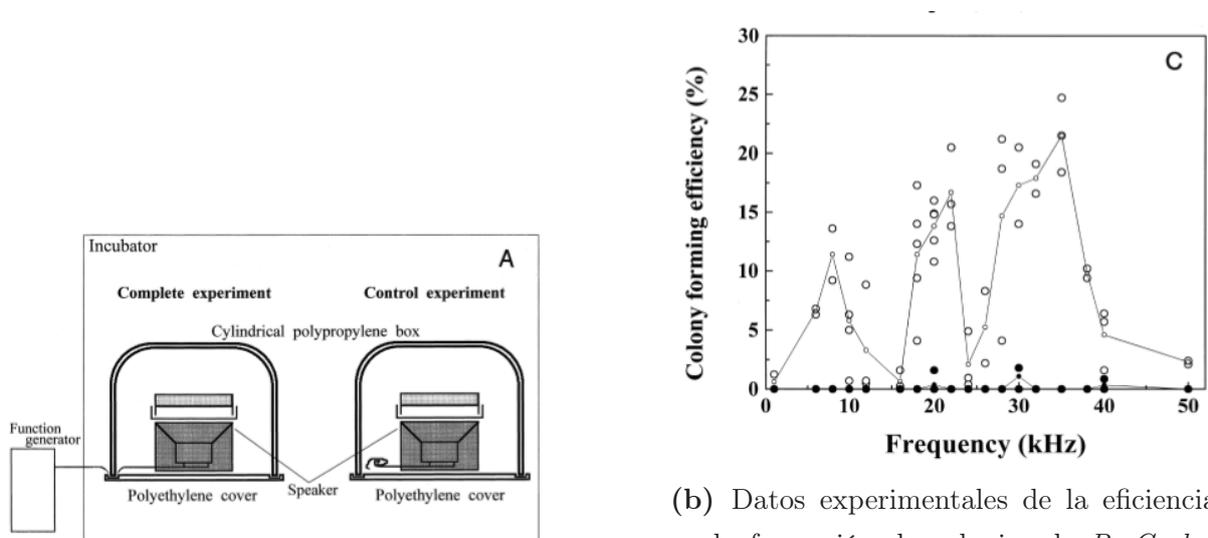


(a) Diseño experimental en un tubo cilíndrico sellado de acrílico para la transmisión de señales de *B. Subtilis* (petri vertical) a *B. Carboniphilus* (petris horizontales). La señal se propaga hasta aproximadamente 40cm. Los (0.0) se refieren a la formación de colonias en el experimento control con el petri vertical no inoculado [212].



(b) Diseño experimental con una tornemesa para balancear el posible efecto de las oscilaciones externas y aislado electromagnéticamente (placas de aluminio). La transmisión de señales sucede aún con una separación de los cultivos mediante una barrera de hierro de 1mm [220].

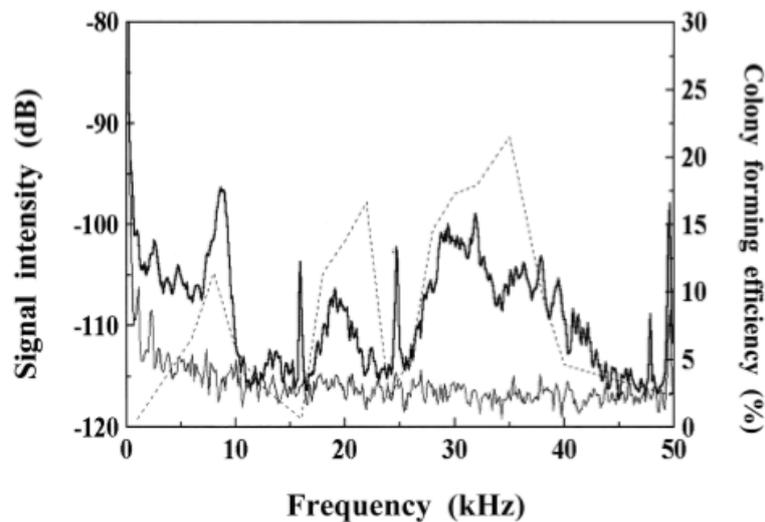
**Figura 3.17:** Dispositivos experimentales utilizados para entender la posible transmisión de señales mediante mecanismos no químicos y no volátiles entre colonias de *B. Subtilis* y *B. Carboniphilus*.



(a) Aparato experimental utilizado para inducir el crecimiento mediante frecuencias sonoras artificiales en los cultivos de *B. Carbo-niphilus* [213].

(b) Datos experimentales de la eficiencia en la formación de colonias de *B. Carbo-niphilus* en condiciones de estrés con sal en el medio y bajo la influencia de frecuencias emitidas por un altavoz mediante un generador de frecuencias sinusoidal [213].

**Figura 3.18:** Aparato experimental y resultados de crecimiento de colonias de *B. Carbo-niphilus* bajo estímulos sonoros.



**Figura 3.19:** Resultados de los experimentos de detección de emisiones sonoras en *B. Subtilis*. La línea gruesa es la intensidad sonora en (dB) detectada por el micrófono. La línea delgada es la intensidad en los experimentos de control. La línea discontinua es el resultado de los experimentos de estimulación sonora mostrados en la figura 3.18 (b).

Estas investigaciones de hace más de 20 años han dado lugar a algunos otros estudios

donde se intenta esclarecer tanto la respuesta del crecimiento de colonias y de cultivos de bacterias mediante estimulación sónica [221][222][223][224][225][226][227], como la emisión de sonido en éstos [228][229]. Conviene mencionar también que parte de estos estudios, que en general son pocos, algunos utilizan metodologías experimentales poco fiables (por ejemplo en la medición sonora en ambientes no aislados del ruido [228][229]) y con enfoques a veces “folklóricos” (por ejemplo en la influencia del uso de ciertas músicas [230]).

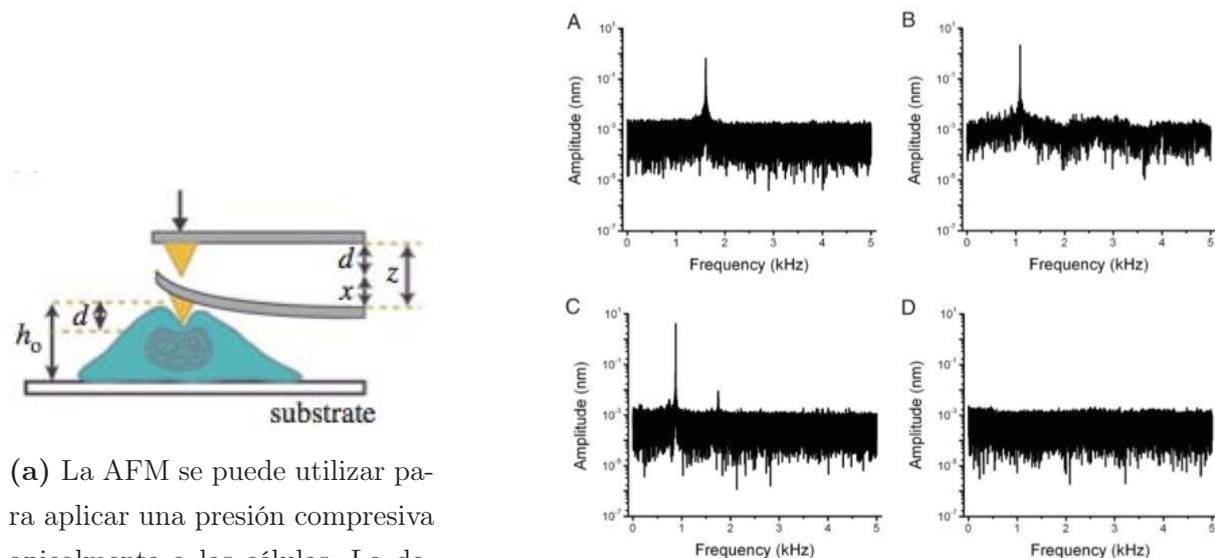
Más allá de este hecho, la señalización sonora detectada en los experimentos de Matsuhashi mediante un sistema compuesto por un micrófono de condensador altamente sensible a la presión, sucede a nivel de colonia, pero como veremos en la próxima sección hay posibles mecanismos a nivel celular que pueden explicar el origen celular en un nivel *micro* de este fenómeno audible a un nivel *macro* de colonia.

### 3.2.2. Comunicación Sonora y Movimientos Intracelulares

A nivel celular existen varios procesos en los que se genera un movimiento oscilatorio y de vibración debido a una multiplicidad causas, como por ejemplo debido las fuerzas osmóticas mediadas por una separación en membranas lípidas, o en la actividad de los motores moleculares y en el citoesqueleto, en reacciones enzimáticas, en el empaquetado de los cromosomas, o en la replicación y transcripción y en la síntesis de proteínas durante su plegado y desplegado [204]. Por otro lado la oscilación polar de las proteínas durante la división celular [231] y la formación del citoesqueleto [232] contribuyen en gran medida a la dinámica en el interior de la célula y son capaces de generar corrientes iónicas de polarización en su interior e inducir mediante la carga de corriente movimientos a una escala *nano*.

Una manera para poder entender estos *nanomovimientos*, y cómo la transmisión de las fuerzas mecánicas juega un papel importante en el desarrollo de las células y para su funcionamiento, es a través del uso de sistemas de microscopia de fuerza atómica (AFM)[233]. Mediante esta clase de dispositivos se ha observado en experimentos con células vivas de levaduras del género *Saccharomyces Cerevisiae* (la levadura típica para hacer pan) que

éstas muestran movimientos *nanomecánicos* a frecuencias características, con movimientos periódicos de 0,8 a 1,6kHz con amplitudes  $3nm$  [234]. En este mismo estudio vieron también como la exposición de las células a un inhibidor metabólico de ATP (Sodio Acídico) hace que estas vibraciones desaparezcan, lo cual indica su naturaleza metabólica. Igualmente, de la dependencia que se observa entre la frecuencia de oscilación de estas células con la temperatura, estos investigadores derivan una energía de activación de la célula de  $58kJ/mol$ , lo cual es consistente con un metabolismo de la célula que involucra motores tales como la kinesina, la dineina y la miosina. Finalmente la magnitud de las fuerzas de  $10nN$  obtenidas con el cantilever del AFM sugiere una actividad concertada de los motores moleculares de la célula, tal como se esperaría en un sistema orientado a transmitir su *status* metabólico mediante una vibración mecánica (Ver figura 3.20).



(a) La AFM se puede utilizar para aplicar una presión compresiva apicalmente a las células. La deflexión de luz de un láser situado en la parte posterior del cantilever se mide a través de un fotosensor sensitivo (PSD) que permite registrar el movimiento [233].

(b) Transformadas de Fourier de los registros de los movimientos en las paredes celulares mediante AFM en función de la temperatura (a) 30C, (b) 26C, (c) 22C, (d) con ácido acídico que inhibe la producción de ATP y detiene el movimiento.

**Figura 3.20:** Medición mediante AFM de los movimientos de las paredes celulares de la levadura *Saccharomyces Cerevisiae*.

Esta transducción de movimientos *nanomecánicos* en sonido, que para el caso de las

levaduras en el experimento oscila entre una frecuencia de los  $0,8kHz$  a los  $1,6kHz$ , sostiene la idea de que las células emiten un sonido que contiene información de su *status* metabólico. El metabolismo por lo tanto refleja la energía interna de la célula (p.e. la producción de ATP) y como consecuencia es probable que al hacerlo también module la intensidad de la señal acústica y su frecuencia. La intensidad emitida por la célula determina por otro lado que tan lejos puede viajar la onda de sonido, así en los casos en los que la célula genere una intensidad y frecuencia determinada puede alcanzar a otra célula receptora (quizá con la que cohabita dentro de la misma colonia) de tal manera que induzca una vibración sobre ésta. Esta vibración finalmente puede de la misma manera condicionar su metabolismo mediante la activación o desactivación de proteínas reguladoras del DNA, tal como se ha observado en otros experimentos de microbiología molecular [235]. Por otro lado, como comentábamos anteriormente, existen receptores especializados en la membrana capaces de transducir señales mecánicas y sonoras. Un ejemplo son los canales mecanosensibles iónicos, muy comunes en varios organismos, que permiten el flujo interno de iones y la polarización interna de la membrana en respuesta a fuerzas de estiramiento en su capa bilípida [236], en la cual se ha demostrado experimentalmente que gracias a sus propiedades elásticas es capaz de propagar perturbaciones localizadas análogas a sonido [237], proporcionando así un mecanismo para la recepción y transducción de una señal sonora y/o vibracional y conformándose finalmente como un posible elemento inherente en la comunicación sonora de las células.

Tal como veíamos en la sección anterior, hay varios modos en los que se pueden propagar estas ondas mecánicas provenientes de la membrana celular. Por un lado éstas se pueden propagar como un fenómeno vibratorio de célula a célula cuando estas crecen formando colonias y/o biofilms y por otro se pueden transmitir como una propagación en el aire que las envuelve o bien dentro del agar, en el caso que crezcan en medios de cultivo semisólidos. En cada uno de estos casos, que analizaremos más detalladamente a través del modelo experimental, existe una atenuación acústica, debida al consumo térmico de energía causada por la viscosidad del medio, que en cierto sentido es análoga a los gra-

dientes químicos que liberan las células en un medio y que conforman la comunicación mediante *quorum sensing* y mediante la emisión y recepción de metabolitos.

Una cuestión importante a remarcar en este punto es que, a diferencia de la comunicación química, la comunicación mediante sonido está menos limitada a la difusión y se puede propagar en una diversidad de medios, no estrictamente de cultivo, lo que de alguna manera permitiría una comunicación y unas respuestas a nivel celular más veloces y óptimas. Finalmente, y como último argumento que apunta hacia esta eficiencia de la comunicación sonora en células, mencionamos que los mecanismos de señalización químicos, como el *quorum sensing*, requieren una cantidad elevada de energía para la síntesis de la molécula en cuestión y de su receptor afín, además de que estas moléculas se deben producir en cantidades suficientes para alcanzar un límite a partir del cual el receptor empieza a censar esa señal (ya que éstas funcionan como un mecanismo análogo al de *integrate and fire*)[238]. Contrariamente las señales sonoras requieren una energía menor para su propagación ya que éstas pueden operar a bajas intensidades y utilizar la energía liberada durante los procesos metabólicos naturales para alcanzar a otra célula e inducir su vibración/polarización y transportar así su información metabólica para que la célula receptora decida finalmente cómo actuar respecto a esta información [204].

Para proseguir en el desarrollo de este capítulo en el próximo apartado partiremos de estos indicios teóricos y experimentales, que apuntan hacia un mecanismo de comunicación sonoro y que como hemos visto media en el metabolismo y en el crecimiento de las células, para intentar aplicarlos al crecimiento y al fenómeno de transición de morfotipos en nuestras colonias de bacterias *P. Dendritiformis* mediante un análisis experimental de la escucha.

### 3.3. Experimentos de Mediciones Acústicas en Colonias de *P. Dendritiformis*

Tal y como hemos observado en la sección 3.1.4, el género de bacterias *P. Dendritiformis* puede cooperativamente producir alteraciones drásticas en su estado genómico interno para transformarse en células diferentes en un nivel *micro* y que se reflejan en su morfotipo de colonia a un nivel *macro*. Esta transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightleftharpoons \mathcal{C}$  selecciona la morfología que maximiza la tasa de expansión de la colonia, apuntando que la manipulación del morfotipo por parte de ésta se genera para alcanzar una mayor adaptabilidad.

Desde un punto de vista comunicacional esta organización y adaptabilidad que muestra la colonia requiere, aparte de una cooperación entre sus células, de un intercambio de información avanzado entre éstas. Esta clase de inteligencia social y de comunicación lingüística normalmente se ha enfocado en el estudio y modelado a través de señalizaciones de naturaleza química, alternativamente los estudios que hemos mostrado en la sección 3.2.1 inducen a pensar que contrariamente existe la posibilidad de una comunicación física de naturaleza sonora y/o vibratorio.

Todo lo anteriormente mencionado nos lleva a plantear una hipótesis de investigación que a lo largo de esta sección contrastaremos mediante los experimentos de medición acústicos en colonias de bacterias realizados dentro de una cámara anecoica.

**Hipótesis 1:** existe un señalamiento acústico y/o vibracional durante el crecimiento de las colonias de bacterias *P. Dendritiformis*.

**Hipótesis 2:** existe un señalamiento acústico y/o vibracional en la transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  durante el crecimiento de las colonias de bacterias *P. Dendritiformis*.

#### 3.3.1. Materiales, Métodos y Diseño Experimental

Para nuestros experimentos utilizamos la cepa *Paenibacillus Dendritiformus* sp. *dendron* T168 [190] proporcionada por el Bacillus Genetic Stock Center de la Ohio State

University por el Dr. Daniel R. Zeigler <sup>x</sup>. Basándonos en las condiciones para el surgimiento de transiciones de morfotipo en 3.1.4, creamos un conjunto de 8 placas de cultivo en petri de plástico de 100mm x 15mm mediante combinaciones de 2 concentraciones de agar (agar for microbiology, Sigma Aldrich) (0,5 %, 1 %) y 4 concentraciones de peptona (peptona de caseina, Sigma Aldrich) (0,1g/l, 0,3g/l, 0,5g/l, 1g/l) junto con 5g/l de NaCl (Difco) y 5g/l de  $K_2HPO_4$  (Difco). Para la inoculación se preparó un cultivo *over night* de 24h en medio LB (LB Broth, Sigma Aldrich) líquido y se inocularon 5μl de cultivo en cada una de las 8 placas. Éstas se incubaron en una incubadora a 37C y solo se sacaron de ésta por un período de aproximadamente de 5min cada uno de los 4 días de duración del experimento para realizar las mediciones acústicas dentro de la cámara anecoica (a una temperatura promedio de 22C). Como control se prepararon 2 placas de petri con agar de (0,5 %, 1 %) sin peptona y sin cultivo de bacterias, éstas se aleatorizaron como control inicial y final de las mediciones en los 4 días. Las placas de control también se mantuvieron en la incubadora junto a las otras con cultivo.

Todas las placas de petri se dejaron crecer durante 2 días en incubadora a 37C previamente al inicio de los experimentos de mediciones acústicas. Durante las 4 sesiones de duración del experimento se realizaron mediciones acústicas en cada una de las 8 placas con una sesión de medición por día. Antes de la medición en cada sesión se realizaron mediciones de calibración con la placa petri de control previamente y al finalizar la sesión. Para la detección de las emisiones acústicas se randomizaron las mediciones en las placas con cultivo para cada una de las sesiones.

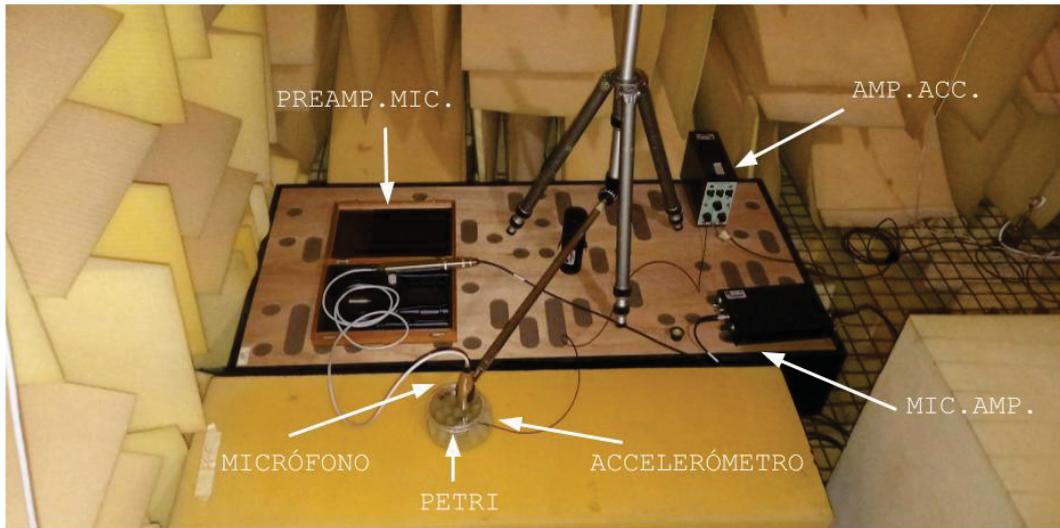
La microfonía para la detección de emisiones acústicas está compuesta de dos sistemas de medición simultáneos dentro de la cámara anecoica del ICAT-UNAM y su montaje estuvo supervisado por el Dr. Felipe Orduña y por el M. en I. Antonio Pérez del Grupo de Vibraciones y Acústica del ICAT-UNAM. El primer sistema está compuesto por un micrófono de condensador para mediciones de sonido de precisión a presiones ultrabajas (Bruel&Kjaer Type 4179), acoplado a un preamplificador con ganancia de +20dB

<sup>x</sup>[http://www.bgsc.org/\\_catalogs/Catpart5.pdf](http://www.bgsc.org/_catalogs/Catpart5.pdf)

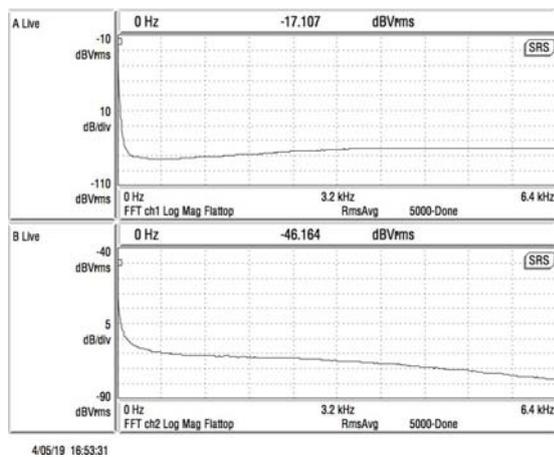
(Bruel&Kjaer Type 2660) y finalmente a un módulo de potencia para suministrar el voltaje de polarización al transductor de  $+40dB$  (GRAS 12AA). En cada una de las mediciones el cartucho del micrófono se sitúa a una distancia de  $0,5cm$  de distancia de la placa de petri. El otro sistema de medición es un acelerómetro piezoeléctrico para medición de vibraciones (Bruel&Kjaer Type 4516), conectado a un amplificador de carga (Bruel&Kjaer Type 2635). Este acelerómetro se engancha mediante cera adhesiva especial de abeja (Beeswax Bruel&Kjaer YJ-0216) en el centro de la parte inferior de la placa de petri para cada una de las mediciones (ver figura 3.21).

Finalmente ambos sistemas están conectados mediante cable coaxial a un analizador dinámico de señal en el modo de canal dual de FFT (Standfor Research SR780). Igualmente la señal de ambos sistemas se registra en audio mediante una tarjeta de sonido (M-Audio FastTrack). El ratio de sampleo en la medición de la FFT es de  $256kHz$ , y se utiliza el sistema de promediado *Root Mean Squared* (RMS) con 5000 samples para una medición con una duración de  $300s$  en cada petri, lo que con una resolución máxima de 800 líneas en nuestra FFT (*spectral data samples*) limita superiormente la medición de frecuencia máxima en nuestro sistema a  $6,4kHz$ . El sistema de *windowing* de la FFT utilizado es del tipo *flattop*, lo cual mejora la precisión de la amplitud a expensas de la frecuencia (ver figura 3.22).

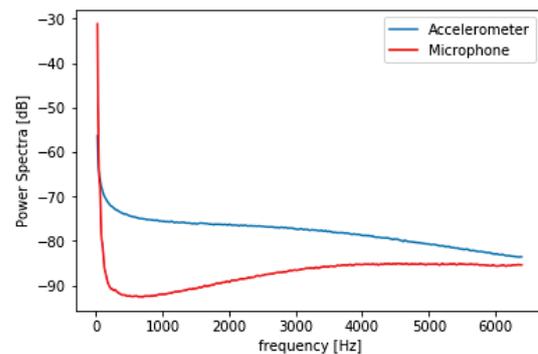
Finalmente la determinación de las transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  en las 8 placas de cultivo durante la duración del experimento se llevó a cabo por simple inspección visual. Posteriormente, se crecieron otros cultivos en las mismas condiciones experimentales para determinar las transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  mediante un sistema DIY de captura *time-lapse* con incubación, al cual denominados *Bafle* (ver figura 3.23, y el anexo C).



**Figura 3.21:** Montaje del experimento dentro de la sala anecoica del ICAT-UNAM. La fuente de mediciones de la placa de petri se coloca encima de dos espumas aislantes para evitar vibraciones. El sistema de medición FFT y de audio se encuentra fuera de la sala.

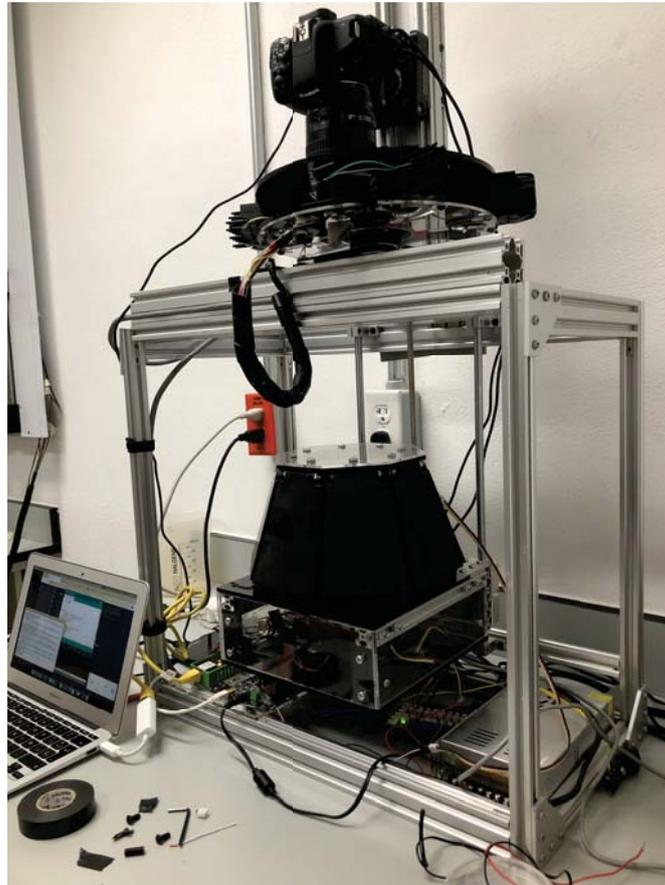


(a) Impresión de la pantalla del analizador de espectro SR780. El canal A corresponde al sistema de microfonía y el canal B al acelerómetro. La magnitud del eje frecuencial de las abscisas está en escala logarítmica



(b) Gráfica exportada de los datos de la figura izquierda, con los datos sobreimpuestos de ambos canales y en escala lineal en el eje frecuencial de las abscisas.

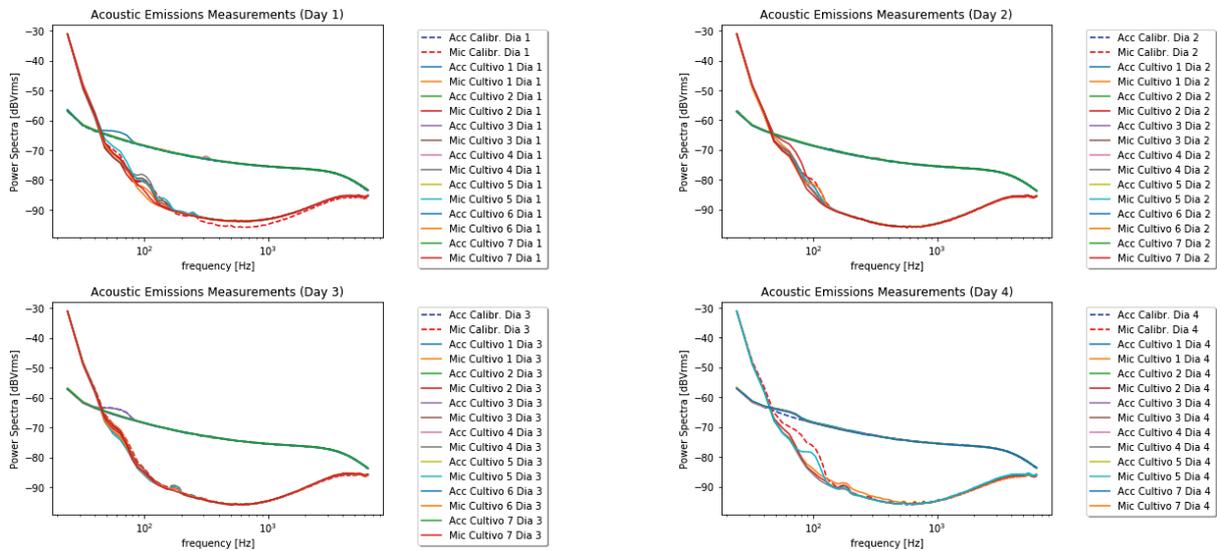
**Figura 3.22:** Calibración del sistema de microfonía y del acelerómetro en la cámara anecoica sin placa de petri antes de los experimentos para determinar el buen funcionamiento de éstos y los límites de amplitud mínima.



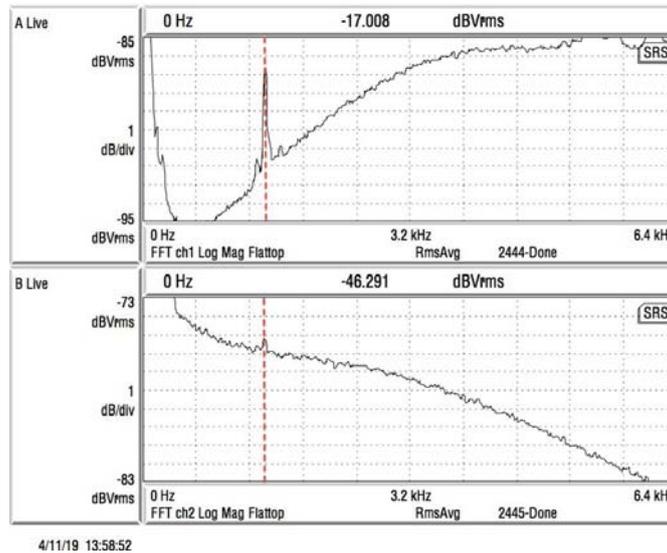
**Figura 3.23:** Sistema *Baffle* de captura *time-lapse* utilizado para la determinación de las transiciones de morfotipo a nivel colonia. El sistema está descrito en el anexo (C) a partir del metapaper “A 3D printable device for spatio-temporal quantification of fluorescently-tagged bacteria in spatially-explicit environments”.

### 3.3.2. Resultados

La imagen 3.24 muestra las emisiones acústicas para cada uno de los 4 días de duración del experimento en cada uno de los 7 cultivos (uno de los cultivos, 1% agar, 0,3g/l peptona, se descartó ya que al secarse el agar durante el cuarto día éste emitió un sonido de crackelado alrededor de los 1,5kHz y con una amplitud inusual de cerca +4dB, ver figura 3.25). En la imagen también se muestra la emisión de calibración obtenida a través del promedio de la calibración inicial y la calibración al finalizar la sesión de medición.



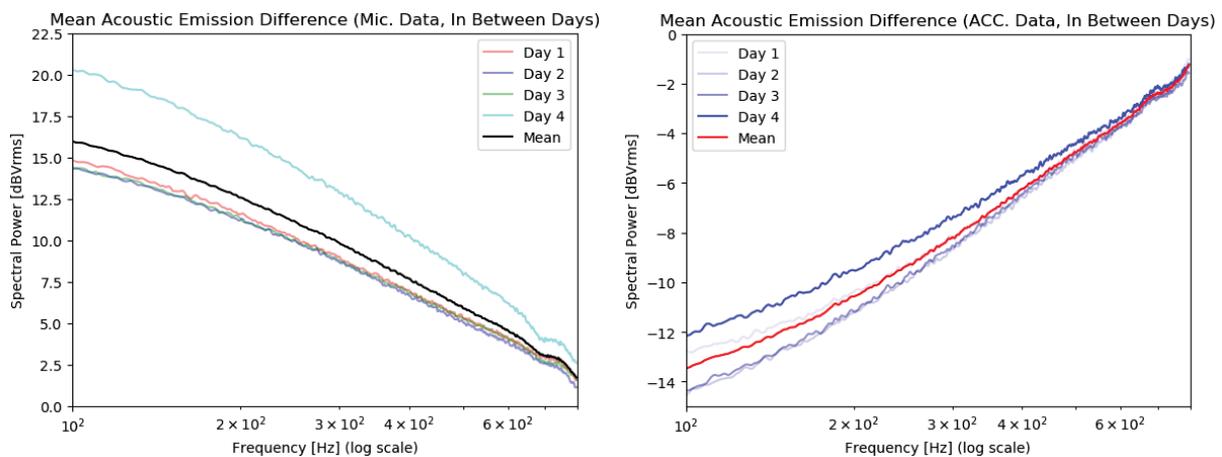
**Figura 3.24:** Mediciones de las emisiones acústicas (micrófono) y vibracionales (acelerómetro) para cada día (lineas continuas), junto a las medidas de calibración (lineas discontinuas).



**Figura 3.25:** Medición acústica del cultivo descartado debido al sonido de crackelado del agar alrededor de los  $1,5kHz$  y con una amplitud de cerca  $+4dBVrms$  (linea discontinua roja).

La figura 3.26 muestra las mediciones ya calibradas mediante la diferencia de cada una de ellas con las mediciones del control para cada uno de los 4 días tanto del sistema de microfonía como del acelerómetro y promediadas para cada uno de los 7 cultivos.

En esta figura se muestra también el espectro promedio de los 4 días, en negro para el micrófono y en rojo para el acelerómetro. En ambos casos se puede observar como las emisiones acústicas del cuarto día están por encima del promedio, aunque la intensidad de las emisiones no sigue una relación lineal progresiva con respecto a los días en los que se realizan las emisiones (las mediciones del primer día son mayores en ambos casos a las del tercer y cuarto día).

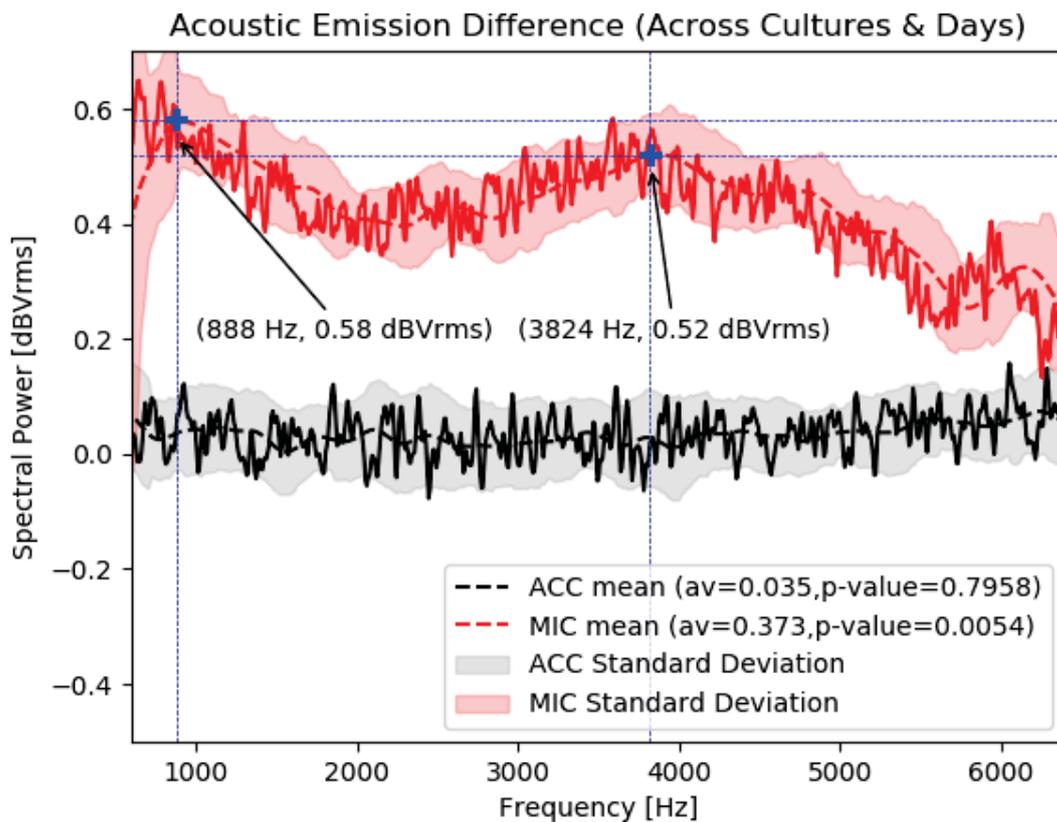


**Figura 3.26:** Mediciones de las emisiones acústicas (micrófono arriba) y vibracionales (acelerómetro abajo) entre días calibradas a través de la diferencia con las emisiones en los experimentos control. Se muestra las medias para cada casa (negro izquierda, rojo derecha).

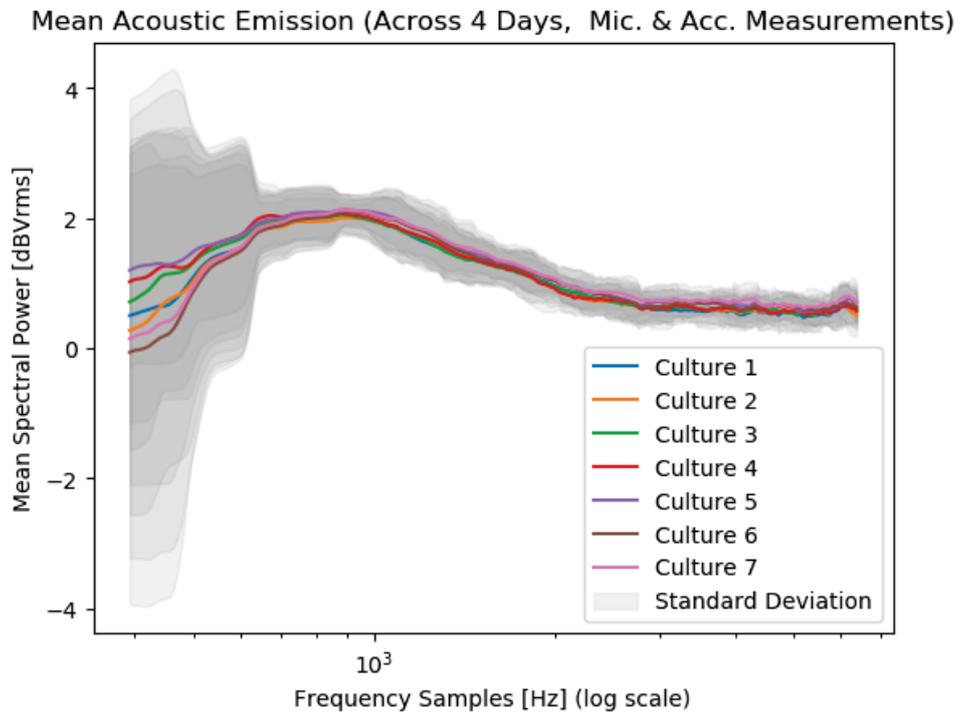
La figura 3.27 muestra las emisiones acústicas calibradas con el control promediadas entre todos los cultivos y entre los 4 días. En esta figura se observa, junto a la desviación estándar, que el valor promedio calculado para las emisiones detectadas con el micrófono es de  $0,373dBVrms$  y para el acelerómetro de  $0,035dBVrms$ . Mientras que para las emisiones detectadas con el acelerómetro no se observa ningún pico de amplitud en el rango frecuencial, para las emisiones detectadas con el micrófono se observan dos picos frecuenciales, uno en los  $888Hz$  con una amplitud de señal de  $0,58dBVrms$  y otro a los  $3824Hz$  con una amplitud de señal de  $0,52dBVrms$ .

Finalmente se corre un test estadístico tipo *t-test* para determinar si la media de las mediciones en las emisiones del experimento de control difiere significativamente de la

media de las mediciones en las emisiones con cultivo. Para ello primero removemos las mediciones entre los  $0\text{Hz}$  a los  $800\text{Hz}$ , ya que como observamos en la figura 3.28 éstas muestran una elevada desviación estándar debido a que la cámara anecoica no permite filtrar este rango de frecuencias en el sistema de alta ganancia y de presión ultra-baja que alcanza nuestra sistema de medición. Una vez removido este rango frecuencial obtenemos un  $p\text{-value} = 0,7954$  no significativo para la medición con el acelerómetro, mientras que para el caso del micrófono obtenemos un  $p\text{-value} = 0,0054$  significativo.

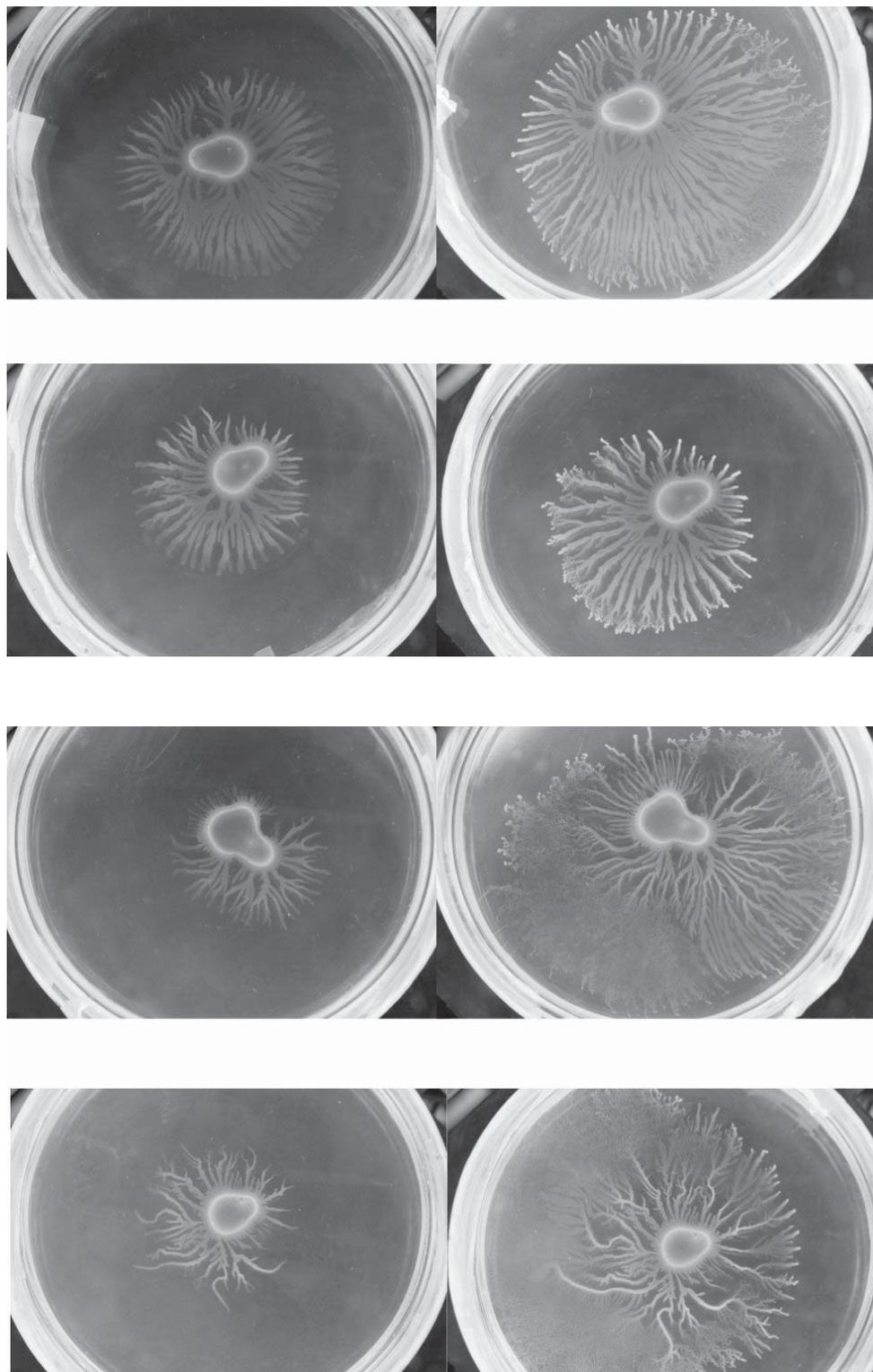


**Figura 3.27:** Emisiones acústicas promediadas con el control entre días y entre cultivos para las mediciones con micrófono y acelerómetro. Se muestra la desviación estándar, el promedio y el  $p\text{-value}$  correspondiente al  $t\text{-test}$ .



**Figura 3.28:** Media de la suma de las mediciones acústicas del micrófono junto a las del acelerómetro entre días y para cada uno de los cultivos.

Por lo que respecta a la determinación de las transiciones de morfotipo, de los 7 cultivos restantes en el experimento en tan solo uno se observó una transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  en la cuarta sesión de medición (sexto día de crecimiento, cultivo con 0,5% agar y 0,1g/l peptona). A partir del crecimiento posterior en laboratorio de los cultivos en las mismas condiciones de agar y peptona que en los cultivos de los experimentos se determinó, mediante el sistema *Baffle* de captura de imágenes, que el cultivo que exhibe más transiciones de fase es el mismo donde se observó la transición de fase en los experimentos en la cámara anecoica (0,5% agar y 0,1g/l peptona), con 4 cultivos de 5 réplicas (ver figura 3.29). No obstante estas transiciones se dieron en todos los casos después de la primera semana de cultivo.



**Figura 3.29:** Imágenes de las transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  observadas, mediante el sistema *Bafle*, en 4 de 5 cultivos con 0,5% agar y 0,1g/l peptona a partir de la segunda semana de crecimiento a 37C.

### 3.3.3. Discusión

A partir de los análisis estadísticos (correlación cruzada y *t-test*, ver anexo 3) de los resultados anteriores no se encuentran valores significativos de relación señal - ruido al comparar las emisiones acústicas captadas por el micrófono y el acelerómetro entre placas con cultivo y placas control individualmente entre días (1 - 4) y cultivos (1 - 7). Sin embargo, como podemos ver en la figura 3.27, en el caso de promediar todos los cultivos entre todos los días obtenemos una proporción señal - ruido significativa para el caso de las mediciones del micrófono, las cuales muestran dos picos de amplitud de  $0,58dBV_{rms}$  y  $0,52dBV_{rms}$  a las frecuencias de  $888Hz$  y de  $3824Hz$  respectivamente.

El hecho de no poder determinar una correlación significativa a partir de la determinación de las transiciones de morfotipo con las señales de medición acústicas no permiten validar la hipótesis 2, ya que aunque las emisiones sean mayores tanto en el micrófono como en el acelerómetro durante el cuarto día, en éste solo 1 de los 7 cultivos experimentó una transición de morfotipo, lo cual finalmente no es estadísticamente significativo. De la misma manera según el *t-test* no existe significancia entre la media de las mediciones de cultivo del día 4 con respecto a las emisiones durante el control de ese día.

Por otra parte, en el caso que se promedian todas las señales de los cultivos entre todos los días con respecto a los promedios de las emisiones en los controles para todos los cultivos y entre todos los días si obtenemos un valor significativo de proporción señal - ruido ( $p-value = 0,0054$ ), lo cual nos permite validar la hipótesis 1, pudiendo afirmar que si existe un señalamiento acústico (y no vibracional ya que la emisión acústica con el acelerómetro es casi nula y no significativa) durante en el crecimiento de las colonias de bacterias *P. Dendritiformis*. Finalmente solo concretar que la señal obtenida con el micrófono nos permite asegurar que lo que hemos medido en los experimentos si corresponde al movimiento proveniente de las bacterias y no del agar, ya que como hemos visto en la figura 3.25, el sonido producido por el agar muestra un pico prominente alrededor de los  $1500Hz$  el cual no está presente en el resultado de las emisiones de la figura 3.27.

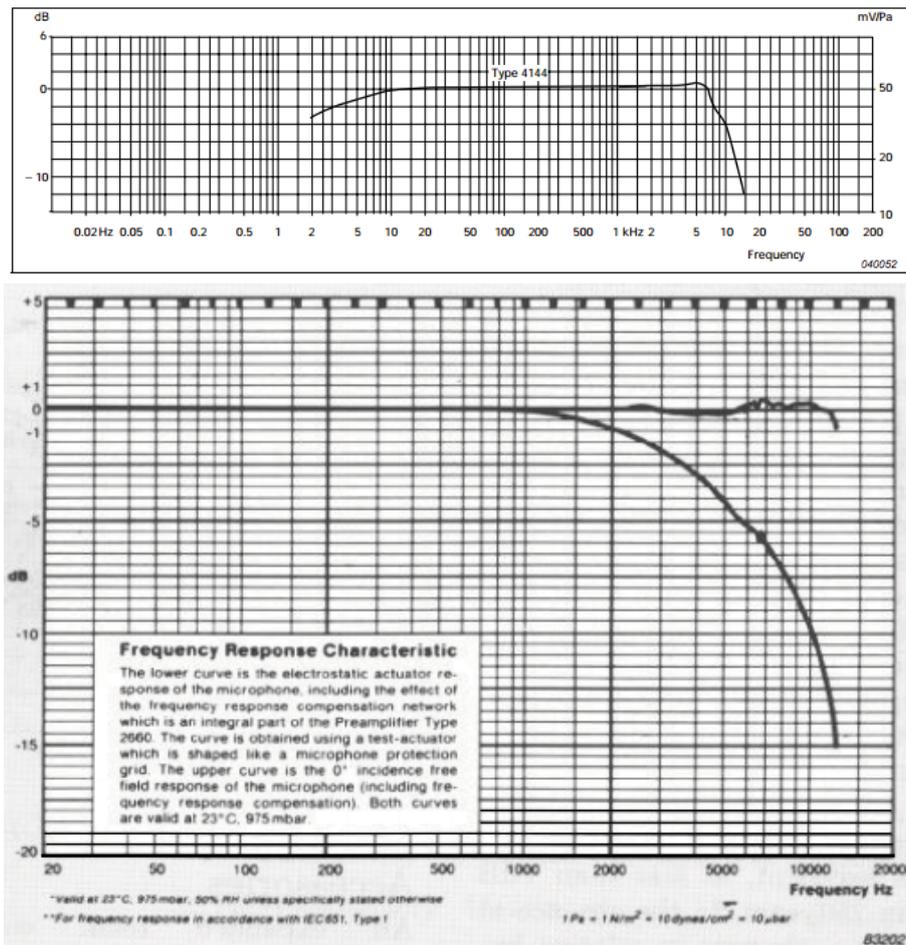
En este punto es conveniente comparar nuestros resultados con los de Matsushashi [213]. Primero de todo comparando el sistema de medición acústico en [213] utilizan la cápsula de micrófono (Type 4144, Bruel&Kjaer) con un preamplificador (Type 2819, Bruel&Kjaer) con una sensibilidad de  $52,5mV/Pa$  lo que resulta en  $-25,6dBre1V/Pa$ , similar a las especificaciones del micrófono que encontramos en las medidas de calibración en el *datasheet* de  $-26dBre1V/Pa$ .

Por otro lado el rango dinámico de este sistema es de  $10dB(A)$  a  $146dB(A - clip)$  y el rango de frecuencias de  $2,6Hz$  a  $8kHz$ . Finalmente a la salida de micrófono y preamplificador la conectan un amplificador de  $+40dB$ . En nuestro caso utilizamos una cápsula de micrófono (Type 4179, Bruel&Kjaer) con una sensibilidad mayor de  $99mV/Pa$  o  $-20,1dBre1V/Pa$  lo que en comparación con [213] nos da una sensibilidad mayor de  $5,5dBre1V/Pa$ , lo que significa que para la misma presión sonora obtenemos una señal de  $5,5V$  mayor en nuestra medición. Igualmente en nuestro sistema el rango dinámico, aunque es menor  $-3dB(A)$  a  $10dB(A - clip)$ , el *noise floor* es mayor en nuestro caso que en el de [213]. Finalmente de la misma manera nosotros también alimentamos el micrófono con un voltaje de polarización de  $200V$  y una ganancia de  $+40dB$ . Dicho esto es difícil explicar los datos de los experimentos de Matsushashi en los cuales su calibración de la medición del control tiene una línea base de alrededor de  $-115dB$ .

En este punto esta medida en el artículo [213] no está referida a voltaje o presión, como tiene que definirse para que el  $dB$  sea una medida absoluta y no relativa. En la nota al pie de foto de la figura 3.19 del artículo [213] dicen que los  $0dB$  están referidos a  $52,5mV/Pa$  (sensibilidad) lo cual no es correcto ya que los  $dB$  de intensidad sonora normalmente se refieren a  $1V$  ( $dBre1V$ ), a  $1V_{rms}$  ( $dBV_{rms}$ , *Root Mean Squared*) como en nuestro caso, o bien a la presión sonora en aire de  $20\mu Pa$  ( $dB SPL$ , *Sound Pressure Level*).

A parte de este error en [213], en la figura 3.19 vemos que ellos reportan medidas en el rango frecuencial de los  $0Hz$  a los  $50kHz$ , lo cual es improbable ya que la respuesta en frecuencia de su sistema decae aproximadamente  $10dB$  en el rango de los  $8kHz$  a los  $15kHz$

y no tiene respuesta más allá de los  $15kHz$ , como podemos ver en la figura 3.30. Por otro lado analizando la figura 3.19 de Matsuhashi, si restamos la señal de calibración con la señal de medición acústica se obtienen picos de amplitud de señal acústica de aproximadamente  $+20dB$  en la frecuencia de  $8kHz$ ,  $+10dB$  en  $20kHz$  y de  $+15dB$  alrededor de los  $30kHz$ . Estas amplitudes corresponden a sonidos con una amplitud mucho mayor que las obtenidas en nuestros experimentos del orden de  $+0,5dBV_{rms}$  (en el rango de  $800Hz$  a  $6,4kHz$ ). El orden de las magnitudes de amplitud sonora obtenidas por Matsuhashi correspondería a señales sonoras audibles en el límite humano en un ambiente silencioso. Igualmente en sus estudios no reportan haber utilizado un ambiente controlado para aislar el sonido externo del emitido por las bacterias, a diferencia de nuestro experimento en el que utilizamos un ambiente controlado de ruido mediante una cámara anecoica, en el que aún así obtenemos amplitudes sonoras dos ordenes de magnitud menores (en el caso en el que hemos obtenido amplitudes del orden de  $+4dB$  ha sido debido a los artefactos sonoros provenientes del crackelado del agar).



**Figura 3.30:** Datos de los *data-sheets* de calibración de la respuesta en frecuencia del sistema de Matsushahi con el micrófono tipo 4144 (arriba) y de nuestro sistema con el micrófono 4179 (abajo, curva superior).

Por todo lo anteriormente expuesto y habiendo contrastado los materiales, la metodología experimental y los resultados en ambos experimentos concluimos que a partir de los resultados expuestos por Matsushahi no se puede inferir que exista una señalización acústica en *B. Subtilis* tal como aseguran en [213]. Por otro lado en nuestro experimento hemos utilizado sistemas de medición más sensitivos y un sistema de aislamiento de ruido, también hemos reportado las medidas acústicas absolutas ( $dBV_{rms}$ ) y no relativas ( $dB$ ), hemos calibrado las mediciones acústicas con respecto a las mediciones de control y finalmente hemos realizado un test estadístico que nos arroja una significancia con respecto a la proporción señal - ruido. Por todo ello seguimos afirmando nuestra hipótesis de investi-

gación 1 al haber encontrado que existe un señalamiento acústico durante el crecimiento de las colonias de bacterias *P. Dendritiformis*.

Por otro lado, contextualizando nuestros resultados con los de Pelling et. al.[234] podemos ver que el rango de frecuencias en el cual obtenemos una emisión acústica está acorde con el rango de  $0,8kHz$  a  $1,6kHz$  obtenido en levaduras mediante técnicas de AFM. No obstante las mediciones de vibración en éstos son en células individuales (y con una geometría diferente ya que sus levaduras son esféricas y nuestras bacterias son cilíndricas) mientras que en nuestro caso partimos de un conjunto de células que van creciendo en un biofilm, la formación del cual está determinada por la producción de una matriz extracelular (ECM, principalmente compuesta de polisacáridos y proteínas). Esta ECM, como la mayoría de los materiales blandos, tiene propiedades viscoelásticas ya que exhibe una respuesta dependiente del tiempo bajo una perturbación mecánica. Así de esta manera podemos preguntarnos cómo se pueden propagar las vibraciones mecánicas a nivel celular en un biofilm, compuesto principalmente por bacterias y una ECM, con respecto a los datos obtenidos en nuestro sistema de mediciones acústicas.

Para ello en la próxima sección proponemos contextualizar nuestros resultados obtenidos para la amplitud de señal acústica a partir de un modelos de crecimiento basado en ecuaciones de reacción-difusión (R-D), y los resultados frecuenciales a partir de un modelo mecánico basado en las vibraciones forzadas de un oscilador armónico simple con amortiguamiento viscoso en un biofilm, el cual crece en la interfaz aire-gel de las placas de agar.

### 3.3.4. Modelos Acústicos en Bacterias

#### Modelado Mediante Sistemas de Reacción - Difusión

A parte de las vibraciones locales a nivel de membrana celular los biofilms, en escalas largas de tiempo, existen en un estado estacionario donde la ganancia de material debida a la división celular y al crecimiento de la colonia es balanceada en promedio por las pérdidas

materiales ocasionadas por el transporte de fluido, tanto de la matriz extracelular (ECM) compuesta por sustancias extrapoliméricas (EPS) como por fluidos lubricantes secretados por las bacterias mismas (*extracellular wetting fluids*, EWF) entre otras causas [239]. Este último mecanismo, ubicuo en varias bacterias (*Serratia Marcescens*, *Bacillus Subtilis*), es el que utilizan también las bacterias *P. Dendritiformis* para efectuar su movimiento característico de “nado”, en el que las células se mueven en línea recta (con una longitud de paso variable, movimiento *run*) hasta que se detienen y voltean (a un ángulo variable, movimiento *tumble*) [189].

Estos comportamientos que forman patrones entre las regiones ocupadas y no ocupadas en las placas de petri crean una interfaz que va moviéndose en el tiempo y que se propaga en condiciones alejadas del equilibrio. Para entender esta propagación hay varios estudios en *P. Dendritiformis* que utilizan ecuaciones de reacción - difusión [240], las cuales se pueden describir generalmente a partir de la tasa de cambio de la densidad de bacterias ( $b$ ) como:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \text{movimiento} + \text{nacimiento} - \text{muerte} \quad (3.1)$$

, donde el movimiento corresponde en nuestro caso al mecanismo descrito de *run and tumble* el cual se puede describir mediante un término de difusión (lineal o no-lineal), el nacimiento corresponde a la reproducción de las bacterias la cual depende de los nutrientes, y la muerte es el término que representa la transición de bacterias a un estado inmóvil.

Uno de los ejemplos canónicos de ecuaciones de reacción- difusión es la ecuación difusiva de Fisher - Kolmogorov (sin el término de muerte y sin tener en cuenta el fluido extracelular secretado por las bacterias), a la cual a parte de la variable que contiene la densidad del campo de bacterias  $b(x, t)$  se le acopla otra ecuación con una variable respectiva a un campo de nutrientes  $n(x, t)$ . Finalmente esta ecuación se puede escribir

como:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = D_b \nabla^2 b + f(b, n) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \nabla^2 n - \mu f(b, n) \quad (3.3)$$

donde  $\mu > 0$  es el ratio de conversión de comida a bacterias y  $f(b, n) = bn$ , lo cual es una aproximación común para bajos nutrientes de la ley de Michaelis-Menten ( $\frac{K}{1+\gamma n} n\sigma$  aproximada a  $Kn\sigma$ , [240]). Reescribiendo 3.2 y 3.3 en forma dimensional tenemos

$$\frac{\partial b}{\partial t} = D_b \nabla^2 b + E_b nb \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \nabla^2 n - E_n nb \quad (3.5)$$

donde el campo  $b$  se mide en unidades de números de bacterias por área en  $cm^2$ . El campo  $n$  se mide en unidades de gramo por área en  $cm^2$ . De los nutrientes que en nuestro caso tenemos en gramos por litros ( $1g/l$  corresponde a  $0,3mg/cm^2$ ), tenemos los coeficientes de difusión en unidades de  $cm^2/seg$ .  $E_b$  es la tasa de reproducción bacteriana en unidades de  $seg^{-1}$  por concentración de bacterias.

Cambiando las variables para que sean adimensionales

$$t \rightarrow tT, \quad x \rightarrow xX, \quad b \rightarrow bB, \quad n \rightarrow nN, \quad (3.6)$$

donde las nuevas variables son adimensionales y las mayúsculas son sus unidades correspondientes. Tomando las unidades espaciales y temporales en escalas naturales tenemos que la escala microscópica de tiempo corresponde al tiempo de reproducción de la bacteria  $\tau_R = T$  y la escala de longitud es la longitud de difusión durante el tiempo de reproducción. Los nutrientes disponibles durante el tiempo de reproducción son

proporcionales al cuadrado de la longitud de difusión. La unidad de longitud es

$$X = \sqrt{D_n \tau_R} \quad (3.7)$$

Así insertando las variables adimensionales en las ecuaciones 3.12 y 3.13 tenemos que

$$\frac{\partial b}{\partial t} = D_b/D_n \nabla^2 b + (TN)E_b n b \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla^2 n - (TN)E_n n b \quad (3.9)$$

Si definimos  $D \equiv D_b/D_n$  e imponemos las condiciones

$$TNE_n = 1 \quad (3.10)$$

$$TNE_b = 1 \quad (3.11)$$

obtenemos las ecuaciones adimensionales

$$\frac{\partial b}{\partial t} = D \nabla^2 b + n b \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla^2 n - n b \quad (3.13)$$

En este punto aunque no vayamos a solucionar 3.12, 3.13, podemos estimar los valores de los parámetros  $E_b, E_n$  y  $D_n$  y derivar de ellos las unidades dimensionales para aplicarlas a nuestros cultivos de bacterias *P. Dendritiformis* para así finalmente estimar la densidad de bacterias, la cual nos será útil en nuestros cálculos posteriores. Para ello tomamos los datos de [240]:

- El tiempo de reproducción cuando las bacterias crecen en condiciones óptimas es de

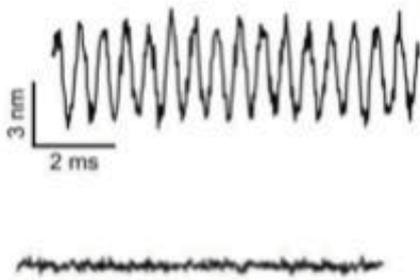
$$T = \tau_R = 25min.$$

- Un valor típico para el coeficiente de difusión de químicos en agar es del orden de  $10^{-7}cm^2/seg$ , utilizando 3.7, tenemos entonces que  $X = 0,01cm$ .
- La concentración de nutrientes en nuestro experimentos varia son (0.1g/l, 0.3g/l, 0.5g/l, 1g/l) que en promedio podemos aproximar a 0.5g/l. En cada placa de petri se vacían aproximadamente 12 ml de medio, lo que en nuestros petris de 100mm de diámetro nos da una concentración de  $N = (500mg/l \times 0,012l)/(\pi(5cm)^2) = 0,076mg/cm^2$ .
- La tasa de reproducción de las bacterias (ecuación 3.2) es  $E_b N n$ , donde  $n$  es la concentración adimensional. La tasa es el inverso del tiempo de reproducción, el cual depende de la concentración de nutrientes. Asumimos que  $N$  es la concentración a partir de la cual el tiempo de reproducción es  $\tau_R$ , Entonces tenemos  $E_b N = 1/\tau_R$  y vemos que se cumple 3.11.
- De la misma manera  $E_n N$  es la tasa de consumo de nutrientes por bacteria. Basándonos en [240], suponemos que durante el tiempo de reproducción una sola bacteria consume tres veces su masa, lo cual nos da un orden de  $3 \times 10^{-12}g$ . Entonces la tasa de consumo de nutrientes por bacteria es  $E_n N \sim 3 \times 10^{-12}g/25min$ . A partir de 3.11 y el valor de  $N = 0,076mg/cm^2$  calculado para nuestros cultivos obtenemos finalmente que  $B = N/T E_n N = (0,076 \times 10^{-3}g/cm^2)/(3 \times 10^{-12}g/bacteria) \approx 25 \times 10^6 bacteria/cm^2$ .

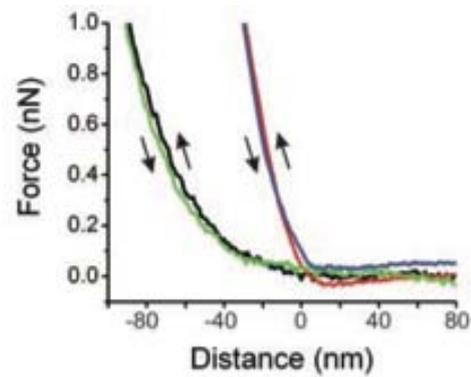
Teniendo en cuenta este último valor de la densidad de bacterias por  $cm^2$  podemos calcular la fuerza resultante de la acción coordinada de todas las bacterias en el biofilm a través del sumatorio de fuerzas  $F_{total} = \sum_i^N F_i$ . El número de bacterias totales en una área que suponemos que cubre la mitad del petri es de aproximadamente  $5 \times 10^8$ .

Tomando los valores experimentales a partir de técnicas AFM [234] tenemos que el promedio de los desplazamientos de la membrana de la pared celular es de  $\Delta x = 3nm$

(figura 3.31a). A partir de la pendiente de la parte lineal de la curva de fuerza-distancia (figura 3.31b) tenemos que la constante del resorte celular es aproximadamente  $K_{cel} = 0,06N/m$ . Finalmente a través de la ley de Hooke tenemos en promedio una fuerza celular  $F_{cel} = 0,2nN$ . Ahora utilizando el sumatorio de fuerzas y dividiendo entre el área podemos encontrar la presión total generada, suponiendo que tan solo la mitad de bacterias están activas en el biofilm, así  $P_{total} = (2,5 \times 10^8 \cdot 0,2 \times 10^{-9}N)/(\pi 0,025^2) = 25,465Pa$ .



(a) Trazas de los desplazamientos típicos de la membrana en células vivas. El desplazamiento promedio es de aproximadamente  $3nm$  (superior). Después del tratamiento con ácido acídico se inhibe la vibración de la membrana (inferior).



(b) Curvas de fuerza-distancia en el cuerpo celular (negro, verde). Las constantes de resorte locales  $k_{cel}$  se pueden determinar a través de la pendiente de la parte lineal de la curva.

**Figura 3.31:** Experimentos de AFM de medición de frecuencias y amplitudes en células vivas de levaduras *Saccharomyces Cerevisiae* [234].

A partir de la sensibilidad de nuestro micrófono de  $-20dBreV/Pa$  más  $+20dB$  de ganancia del preamplificador tenemos una sensibilidad nominal del sistema de  $1V/pa$  ( $0dBre1V/Pa$ ). Así nuestro input ( $I$ ) en volts es igual a la sensibilidad multiplicada por la presión total  $I = 1V/pa \cdot 25,465 \times 10^{-3}Pa = 25,465V = 18,006Vrms$ . A partir de aquí podemos calcular la intensidad final en  $dBVrms$  a partir de

$$I_{final} = 20\log_{10}(18,006Vrms/1Vrms) = 25,108dBVrms. \quad (3.14)$$

Comparando estos resultados con los obtenidos en 3.3.2 de  $0,373dBV_{rms}$  obtenemos una medida de dos ordenes de magnitud mayor no consistente con nuestros resultados pero sorprendentemente similares a los de Matsushashi [213].

No obstante si consideramos el cultivo de crecimiento como un material en 3D en el que las bacterias se superponen unas a otras, entonces sucede que su fuerza normal no es perpendicular al plano de crecimiento. En este caso tendríamos que una fracción de las fuerzas se modificarían a partir de  $F'_{cel} = F_{cel} \cos \theta$ .

Por otro lado si consideramos que las membranas celulares no están directamente en contacto con el aire sino a través de un biofilm con propiedades viscosas tenemos que  $F''_{cel} = F'_{cel} - F_{fric}$ , donde  $F_{fric} = cv$  es la fuerza de fricción, con  $c$  como coeficiente de amortiguamiento y  $v$  la velocidad de la bacteria en el medio viscoso. Para calcular  $c$  se puede utilizar la ley de Stokes para números de Reynolds bajos a partir de  $c = 6\pi\eta r$ , donde  $r$  es el radio de la bacteria (suponiéndola esférica) y  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad del biofilm. Tomando los datos de velocidad de la bacteria como  $v = 1 - 10\mu m s^{-1}$  (promedio de  $v = 5\mu m$ )[240], el radio de la bacteria como  $r = 1\mu m$  y la viscosidad del biofilm como  $\eta = 250\eta_0$ , con  $\eta_0 = 1 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$  la viscosidad del agua [241], vemos que  $F_{fric} = cv = 6\pi\eta r v = 6\pi(250 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s)(10^{-6} m)(1 \cdot 10^{-6} m/s) = 4,7124 \cdot 10^{-9} N = 4,7124 nN$ .

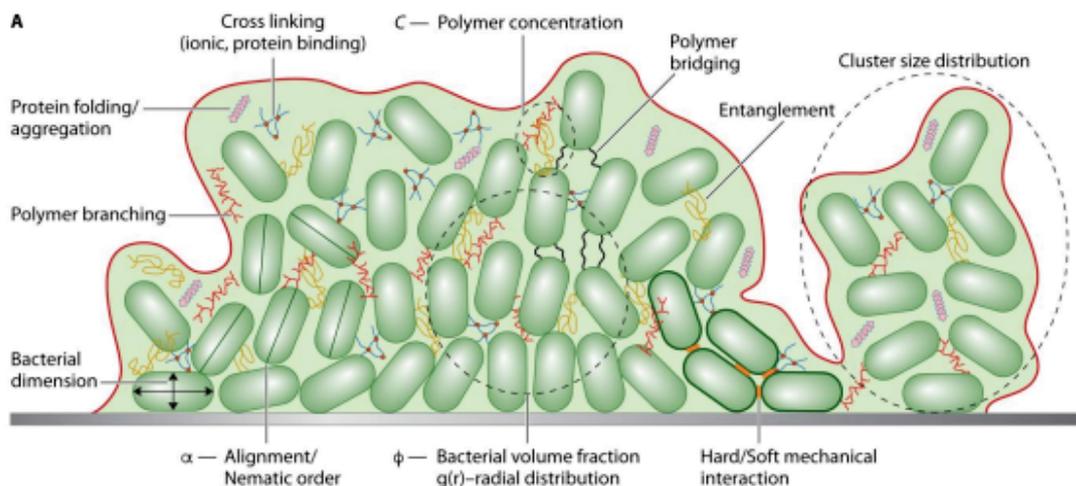
Comparando este resultado con el de Pelling donde la  $F_{cel} = 0,2nN$  (y que en el caso máximo llega a  $F_{cel} = 10nN$ [234]) vemos que la fuerza de fricción es 1 orden de magnitud mayor a la de la membrana celular, lo cual a partir de un sumatorio de fuerzas netas  $F''_{cel} = F'_{cel} - F_{fric}$  resulta en un apagamiento de la fuerza de la membrana.

Oscilando entre estas aproximaciones podría suceder que finalmente el conjunto de ambos fenómenos representados por  $F'_{cel}$  y  $F_{fric}$  pudieran afectar en 1-2 ordenes de magnitud a la presión celular total transmitida en el aire resultando en que nuestras mediciones de amplitud acústica fueran plausibles. No obstante para entender mejor como estos fenómenos pueden determinar nuestros resultados en las mediciones acústicas proponemos a continuación un modelo mecánico para intentar describir la atenuación de la señal acústica en amplitud y frecuencia.

### Modelado Mediante Sistemas Mecánicos

Como apuntábamos, debido a la división celular, al transporte y a la vibración de índole metabólica en las membranas celulares, se generan fuerzas de estrés en el conjunto del biofilm. Éste exhibe comportamientos tanto elásticos como de carácter fluídico, lo cual lo caracteriza como un material viscoelástico capaz de distorsionarse bajo fuerzas mecánicas [239]. El campo de estudio que investiga estos comportamientos en los materiales se denomina reología y ésta intenta descifrar los cambios estructurales subyacentes a la aplicación de determinadas fuerzas.

Los biofilms son sistemas reológicos únicos ya que están compuestos por células vivas y por una ECM dinámica [242]. La secreción de la ECM está condicionada tanto por la expresión génica como por las condiciones ambientales, lo cual resulta en una heterogeneidad en su composición y en su estructura espacial [218]. Las moléculas constitutivas que lo forman se auto-ensamblan a través de interacciones poliméricas de entrelazamiento, de unión proteica o de unión cruzada para formar estructuras que pueden soportar el estrés mecánico [239] (ver figura 3.32).



**Figura 3.32:** Esquema de un biofilm y de los distintos componentes que pueden afectar la arquitectura y la viscoelasticidad de éste [242].

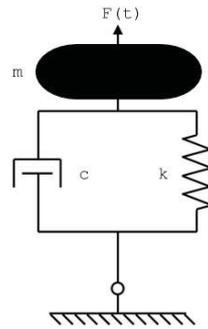
Recientemente han surgido varios estudios reológicos y estudios basados en modelos matemáticos que intentan capturar las respuestas biomecánicas de los biofilms bacteria-

nos en presencia de cambios físicos [243][241]. Las propiedades físicas que condicionan el crecimiento y también como las bacterias se enganchan y se desprenden en el biofilm dependen de la ECM. De la misma manera estudios recientes muestran como las proteínas, el eDNA y los polisacáridos que constituyen la ECM dictan en gran medida la arquitectura y la viscoelasticidad de los biofilms [218]. Así tomando en cuenta las propiedades viscoelásticas de la ECM y del biofilm proponemos un modelo mecánico partiendo del caso más sencillo, correspondiente a la oscilación forzada en un oscilador armónico simple con amortiguamiento viscoso .

### *Modelo de Oscilador Harmónico*

Este sistema, con un grado de libertad ( $x$ ), se compone de un conjunto de masa ( $m[kg]$ ), muelle (constante hookeana  $k[N/m]$ ) y amortiguador (constante de viscosidad newtoniana  $c[Ns/m]$ ) (ver figura 3.33). En el caso que se aplica una fuerza externa  $F(t)$  a la masa, que en nuestro sistema consiste en una bacteria, las fuerzas de restauración vienen determinadas para el caso del muelle por  $-kx$ , y en el caso del amortiguador por  $-c\dot{x}$ . Aplicando la segunda ley de Newton tenemos que la ecuación del movimiento se puede escribir como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t). \tag{3.15}$$



**Figura 3.33:** Diagrama de un oscilador simple con amortiguamiento viscoso con un grado de libertad.

Cuando  $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$ , tenemos el caso de excitación armónica, la cual en nuestro caso tomando los datos de Pelling [234], la amplitud es  $F_0 = 0,2 - 10nN$  y la frecuencia angular  $\omega = 0,8 - 1,6kHz = 5027 - 10053rad/s$ . Así la solución general para 3.15 se puede escribir como:

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \Phi) + X \cos(\omega t - \Theta) \quad (3.16)$$

donde el primer término corresponde a la respuesta transitoria y el segundo término a la respuesta de estado estacionario;  $A$  la amplitud y  $\Phi$  la fase de la respuesta transitoria se pueden obtener de las condiciones iniciales;  $X$  y  $\Theta$  de la respuesta estacionaria se pueden obtener a partir de

$$X = \frac{F_0}{k\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \quad (3.17)$$

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta\beta}{1 - \beta^2} \quad (3.18)$$

donde  $\beta = \omega/\omega_n$  es el ratio de frecuencias. La frecuencia natural amortiguada se puede

escribir como:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.19)$$

donde la frecuencia natural es  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  y  $\zeta = c/(2\sqrt{km})$  es el ratio de amortiguamiento.

Así para nuestro caso podemos calcular la frecuencia natural a partir de los valores de  $k = 0,06N/m$ ,  $m = 1 \cdot 10^{-12}kg$  y tenemos  $\omega_n \approx 244949rad/s \approx 39kHz$  la cual difiere de la frecuencia natural de Pelling  $\omega = 0,8 - 1,6kHz$ . Si tomamos este último valor experimental podemos calcular la frecuencia de amortiguamiento  $\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{1 - (\frac{c}{2\sqrt{km}})^2}$ , con el valor de la constante de fricción calculado anteriormente de  $c = 6\pi\eta r = 4,712 \cdot 10^{-6}Pa \cdot s \cdot m$ , lo cual nos da que  $\omega_n \approx \omega_d$ .

De la misma manera, si extrapolamos el sistema de una bacteria anterior para el conjunto de  $N = 5 \times 10^8$  bacterias, tenemos que en el caso en que los sistemas de bacterias estén conectados en paralelo a través de  $N$  muelles y  $N$  amortiguadores entonces  $k_{eq} = kN$  y  $c_{eq} = cN$ . En este caso la masa total es  $M = Nm$ , y por lo tanto la frecuencia amortiguada del sistema equivalente  $\omega_{d(eq)} = \sqrt{\frac{Nk}{Nm}} \sqrt{1 - (\frac{Nc}{2\sqrt{NkNm}})^2} = \omega_d \approx \omega_n$ .

Como observamos, este modelo simple no es capaz de describir la atenuación en frecuencias considerando una bacteria, o un conjunto de éstas, acopladas mediante un muelle y un amortiguador en un oscilador armónico. No obstante podemos utilizar modelos más realistas, provenientes del campo de modelado en reología de medios viscoelásticos tales como el modelo de Voigt [244].

### **Modelo de Voigt**

El modelo de Voigt se puede representar de la misma manera que nuestro oscilador armónico con un amortiguador viscoso y un muelle simple elástico conectados en paralelo de tal manera que la deformación en ambos es la misma  $\varepsilon_{total} = \varepsilon_a = \varepsilon_m$  (dónde el subíndice  $a$  se refiere al amortiguador y  $m$  al muelle). De la misma manera, al estar

conectados en paralelo, la tensión en el sistema es  $\sigma_{total} = \sigma_a + \sigma_m$ . Partiendo de la ecuación de Hooke generalizada  $\sigma_{ij} = \sum_{l,k} C_{ijkl}\varepsilon_{kl}$ , donde  $\sigma_{ij}$  es el tensor de tensiones,  $\varepsilon_{kl}$  es el tensor de deformaciones y  $C_{ijkl}$  es el tensor de elasticidad de cuarto orden.

La relación entre la tensión y la deformación en nuestro sistema de Voigt es:

$$\sigma(t) = \left( \kappa - \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \varepsilon(t) \quad (3.20)$$

donde  $\kappa$  es el modulo elástico y  $\eta$  la viscosidad. Por otro lado, partiendo de la ecuación de Helmholtz para una onda acústica monocromática tenemos que

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) + k^2 \psi(\mathbf{r}) = 0, \quad k = \frac{\omega}{c}, \quad (3.21)$$

donde la transformada de Fourier del potencial  $\phi$  con respecto la variable temporal nos da

$$\psi(\mathbf{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} \phi(\mathbf{r}, t) dt. \quad (3.22)$$

Este potencial  $\phi$  para el caso de un fluido barotrópico corresponde al potencial de velocidades que determina nuestra ecuación de onda acústica

$$\mathbf{v}' = \nabla \phi, \quad \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \nabla^2 \phi \quad \left( \rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} = -p' \right) \quad (3.23)$$

donde  $c_0$  es la velocidad del sonido,  $\rho_0$  la densidad del medio y  $p'$  la presión.

Partiendo de 3.21 tenemos que el vector de onda complejo se puede escribir para una dimensión como

$$k = \sqrt{-\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} \psi(x)}, \quad (3.24)$$

de tal manera que la velocidad local y la atenuación se pueden escribir como

$$c = \frac{\omega}{Re\{k\}}, \quad \alpha = Im\{k\}. \quad (3.25)$$

Ahora si insertamos la ecuación reológica de Voigt 3.20 en 3.21 tenemos que

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\rho_0 \omega^2}{(\kappa + i\omega\eta)} \psi = 0, \quad (3.26)$$

y de la misma manera a través del vector de onda complejo 3.25, podemos obtener la velocidad local de propagación y la atenuación para nuestro sistema de Voigt a partir de

$$c_V = \sqrt{\frac{2(\kappa^2 + \omega^2\eta^2)}{\rho_0(\kappa + \sqrt{\kappa^2 + \omega^2\eta^2})}}, \quad (3.27)$$

$$\alpha_V = \sqrt{\frac{\omega^2(\sqrt{\kappa^2 + \omega^2\eta^2} - \kappa)}{2(\kappa^2 + \omega^2\eta^2)}}. \quad (3.28)$$

En nuestro caso tomamos los siguientes valores:  $\rho_0 = 0,12\rho$  con  $\rho = 998kg/m^3$  como densidad del agua [241],  $\omega = 1200Hz$  que corresponde a un promedio de los datos frecuencia local de Pelling [234],  $\kappa = 0,006N/m$  [234] y  $\eta = 250\eta_0$  con  $\eta_0 = 1 \cdot 10^{-3}Pa \cdot s$  como viscosidad del agua [241]. Finalmente para la ecuación 3.28 obtenemos una atenuación  $\alpha_V \approx 536Np/m$ .

En este punto si suponemos que las fuerzas originadas en las membranas celulares son radiales podemos considerar dos casos: uno en el que la propagación de las ondas de presión elásticas son normales a la superficie y otro donde éstas son longitudinales. En el primer caso si consideramos que la altura del biofilm es del orden de  $h = 100\mu m$  [245], obtenemos una atenuación de  $0,0536Np$  que corresponden a  $0,465dB$ . En el caso en que las ondas de presión sean del tipo ondas s de superficie, la atenuación a una distancia promedio de crecimiento radial del cultivo de  $0,025m$  es de  $13,4Np$  y de  $116,4dB$ .

Por otro lado si calculamos la velocidad de propagación local en el sistema a partir de 3.27, encontramos  $c_V = 189,55m/s$ , que corresponde aproximadamente a la mitad del

valor de la velocidad de propagación del sonido en el aire. Por lo tanto, en el caso en el que se tenga una señalización de carácter químico y no sonoro, podemos calcular la velocidad de propagación de un cierto metabolito difundiéndose en un medio considerando el valor promedio de distancia ( $MSD$ ) en una partícula que sigue un movimiento browniano. En este caso  $MSD = \langle (x - x_0)^2 \rangle = 2nDt$ , donde  $n=1$  para 1-D, y para una constante de difusión típica de un químico en agar de  $10^{-7} cm^2/s$  nos da para un tiempo de  $t = 1s$  un valor de  $MSD = 2 \cdot 10^{-9} m$ , lo que supone 11 órdenes de magnitud de diferencia con respecto a la difusión de una onda sonora en el biofilm, lo cual hace cuestionarnos finalmente ciertos aspectos entorno a la eficiencia con respecto a la transferencia de información en ambos mecanismos.

### 3.3.5. Conclusiones

Recapitulando los resultados experimentales y los modelos matemáticos anteriormente expuestos vemos que éstos apuntan hacia una dirección en la que la transducción de movimientos intracelulares a sonidos externos (**Hipótesis 1**) respalda la idea de que las células emiten sonidos para transportar información relativa a su *status* metabólico. Como hemos visto el *status* metabólico se refleja en la energía interna vibratoria de la célula, y por lo tanto es probable que pueda llegar a modular tanto la intensidad como la frecuencia de las vibraciones y de las señales acústicas que emiten las bacterias durante su ciclo de vida.

Remarcando en lo anteriormente expuesto, la intensidad de vibración de la célula, que se corresponde con la amplitud de oscilación de la membrana celular, puede determinar que tan lejos se propaga una señal. Mediante una intensidad y una frecuencia adecuada, y tomando en cuenta el modelo de atenuación, una determinada señal generada por una célula emisora podría alcanzar a una célula receptora a una cierta distancia e inducirla a vibrar. Esta vibración a su vez podría modular el metabolismo de la célula receptora activando o desactivando ciertas proteínas reguladoras de DNA [235], o bien modulando su expresión génica [246][247]. Igualmente como ya habíamos apuntado en , las señales

sonoras pueden ser transducidas mediante receptores específicos de la membrana tales como los canales mecanosensitivos iónicos, los cuales permiten el flujo interno de iones y la polarización interna en respuesta a fuerzas de deformación en la membrana bilípida [236].

Por otro lado también, mediante el modelo de atenuación de Voigt, vemos que las ondas acústicas se diluyen progresivamente en el medio del biofilm, lo cual genera gradientes de energía vibratoria en éste análogos a los gradientes de difusión química que operan en los mecanismos de señalización quemo-táctica. Tomando en cuenta los resultados del modelo vemos que las colonias de bacterias podrían utilizar mecanismos sonoros ya que, a parte de que éstos se propagan más rápido que los mecanismos químicos debido a que están menos sujetos a procesos de difusión, los primeros podrían operar a bajas intensidades de señal y utilizando mecanismos de resonancia a nivel celular, los cuales podrían lograr amplificar una determinada señal sonora a lo largo de toda una colonia.

Otro aspecto a tener en cuenta en una posible comunicación celular basada en mecanismos sonoros es el rol que puede jugar la selección de una frecuencia determinada de vibración en la comunicación entre células. Cada bacteria individual posee una frecuencia natural, así en el caso de Pelling estas frecuencias oscilan entre los  $800Hz$  y los  $1600Hz$  mientras que en nuestras mediciones en *P. Dendritiformis* tenemos dos picos frecuenciales alrededor de los  $888Hz$  y los  $3824Hz$ , lo cual podría ser una característica distintiva del tipo de bacteria. Este hecho, en el que una determinada bacteria posee una especie de “voz” propia caracterizada por un tono distintivo, les permitiría comunicarse en situaciones ruidosas y en consorcios interbacterianos e interespecie.

Esta investigación, en términos generales, permite ampliar la evidencia que sostiene que los microorganismos son capaces de generar y responder a señales sonoras, y más ampliamente de carácter físico. No obstante se requiere más trabajo, principalmente de índole experimental, enfocado a la detección de estas señales. Una posibilidad para obtener medidas más precisas y robustas de las emisiones acústicas durante el crecimiento de las bacterias sería utilizar sensores resonantes de ondas acústicas de superficie (SAW,

*Surface Acoustic Waves*) o bien técnicas de interferometría láser por efecto Doppler. Estas últimas se han utilizado por ejemplo en biotremología para el estudio de las vibraciones y la comunicación en telas de araña, y son capaces de detectar oscilaciones en el rango nanométrico [248]<sup>xI</sup>.

Por otro lado las redes de señalización química y física dentro de la célula y exteriormente a ésta en la colonia y en los biofilms existen de manera entrelazada, por lo tanto es difícil delimitar dónde empiezan unas y acaban lo otras. No obstante mediante manipulaciones a partir de *knockouts* genéticos sería posible aislar ciertos mutantes deficientes en la generación o en la respuesta a una determinada señal, lo cual podría funcionar como una metodología para discriminar ciertos mecanismos.

Finalmente la posibilidad de que operen múltiples mecanismos de señalización en conjunción en un mismo microorganismo, como por ejemplo químicos, vibracionales y electromagnéticos (o mecanismos más exóticos<sup>xII</sup>), no resultaría un fenómeno insólito. El denominador común entre todos estos mecanismos es que éstos son modos orientados hacia el transporte de energía. Este transporte genera gradientes energéticos, y termodinámicamente la materia viva lo que hace es disipar (y/o estructurar) estos gradientes en el tiempo y en el espacio, generando a la vez flujos información, a los cuales cuando se les adjudica un “proposito” subyacente los entendemos como un proceso comunicacional. Por lo tanto y tal como apunta Reguera [204]:

“Physical signalling could be an ancestral language of all living forms and, perhaps, a key code to decipher if we want to understand the microbial conversations that have for so long remained inaudible.”

---

<sup>xI</sup>El Prof. Rodrigo Soto de Núcleo Milenio - Active Matter de la U.Chile, ofreció la posibilidad de utilizar su laboratorio para hacer este tipo de mediciones, por cuestiones de tiempo no se logró.

<sup>xII</sup>Sólo mencionaremos aquí una posible correspondencia (especulativa) entre estudios que demuestran como la estimulación de luz produce biofotones que se conducen a través de fibras neurales en la espina dorsal en ratas y que funcionan como (posibles) señales comunicacionales [249], estudios que demuestran el (supuesto) entrelazamiento entre bacterias fotosensibles con luz [250], y estudios (controversiales) en mecánica cuántica y cognición que demuestran una correlación entre estados conscientes durante la toma de decisiones y observables en el experimento de la doble rendija [251].

### 3.4. Proyecto *Comunicaciones Especulativas*

Para cerrar este capítulo presentamos el resultado, en proceso, del proyecto de investigación artística *Comunicaciones Especulativas*, desarrollado en colaboración con el colectivo Interspecifics (Leslie García, Paloma López, Emanuel Anguiano y Felipe Rebolledo) junto al Keymer Lab (Juan Keymer) y al Federici Lab (Fernán Federici) de la P. Universidad Católica de Chile.

Este proyecto se basa en <sup>xiii</sup>:

Una máquina que es capaz de observar y aprender de un microorganismo para crear una partitura (*score*) audiovisual a partir de los patrones que encuentre en su comportamiento. Este proyecto se centra en la creación de una inteligencia artificial, la cual reconoce comportamientos organizados reiterativos en cultivos biológicos y los transforma en eventos que dota de una gestualidad audiovisual específica con el fin de lograr una composición auto-generativa que responde a las lógicas de decisión que esta inteligencia construye con el tiempo. Para lograrlo es necesario el desarrollo de un dispositivo de búsqueda y transmisión de señales análogas provenientes de microorganismos, una plataforma audiovisual que permita la expresión de las señales biológicas y que además pueda hacerse cargo de su propio mantenimiento biológico. El resultado es transmitido en tiempo real a través de un canal digital creando la posibilidad de observar el proceso de coevolución de la máquina en tiempo real.

Inspirado en centros como el SETI, acrónimo del inglés *Search for ExtraTerrestrial Intelligence* o Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre, *Comunicaciones Especulativas* es tanto un espacio de investigación de comunicaciones no antropocéntricas, como un sistema auto-generativo de inteligencias no humanas. Este proyecto busca resaltar la gestualidad del tiempo real expresado en vida y de esa vida como un generador de cambio e inestabilidad tangible a partir de

---

<sup>xiii</sup><http://interspecifics.cc/comunicacionesespeculativas/>

representaciones tanto visuales como sonoras. La materia tiene por sí misma una performatividad expresiva por lo que buscamos crear una interfaz que le permita al otro expresar su complejidad y diversidad a través de un lenguaje que sea tangible tanto para una máquina como para nosotros humanos. Una narrativa que se construye a partir del cruce de la ciencia, la ficción, la vida y la ingeniería y que busca apropiarse del imaginario social para crear vínculos con aquello que parece tan ajeno, pero que conforma en sí mismo la ontología de nuestra especie.

El sistema comienza con el procesamiento en tiempo real de cultivos bacterianos. Estos cultivos son analizados con visión artificial (*computer vision*) para detectar formas y movimiento, y con aprendizaje automático no asistido (*machine learning*) para detectar los patrones que se repitan en el tiempo. Los datos de la existencia de esos patrones son enviados a un algoritmo de inteligencia artificial que reconoce y almacena esa información como eventos y les concede una cierta gestualidad sonora y visual a partir de un conjunto de opciones que el propio algoritmo elige y modifica según se sigue alimentando.

### 3.4.1. Descripción del Sistema

El sistema global que comprende el proyecto consta de diferentes partes entrelazadas entre ellas tal y como podemos observar en el diagrama de flujo de la figura 3.35. La primera parte del sistema se basa en el desarrollo de una plataforma abierta para la construcción de sistemas genéricos de microscopia automatizados DIY, construida tomando como referencia el sistema del *Open Microscope* desarrollado por OpenLab Tools - Cambridge University<sup>xiv</sup>. Este sistema se basa en una estructura de *beams*, partes 3D impresas, controladores de Arduino para los motores *steppers* y una RaspberryPi para el sistema de captura y procesado de imágenes (ver figuras 3.34, 3.36). Toda la documentación técnica

<sup>xiv</sup><http://openlabtools.eng.cam.ac.uk/Instruments/Microscope/>

del proyecto se puede encontrar en el repositorio de github <sup>xv</sup>.

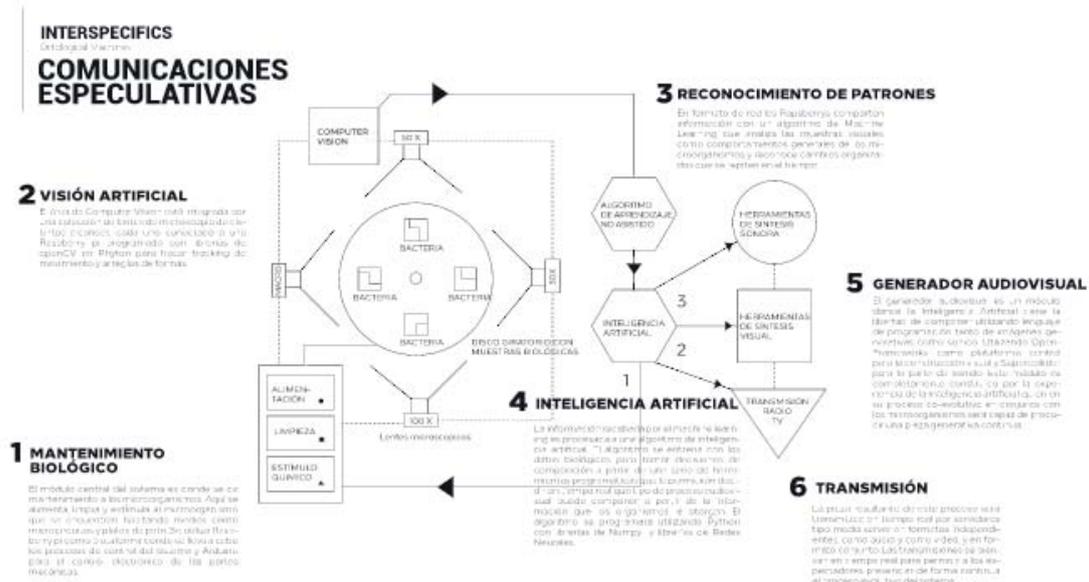


Figura 3.34: Diagrama de flujo del sistema de “Comunicaciones Especulativas” (<http://interspecifics.cc/comunicacionesespeculativas/>).

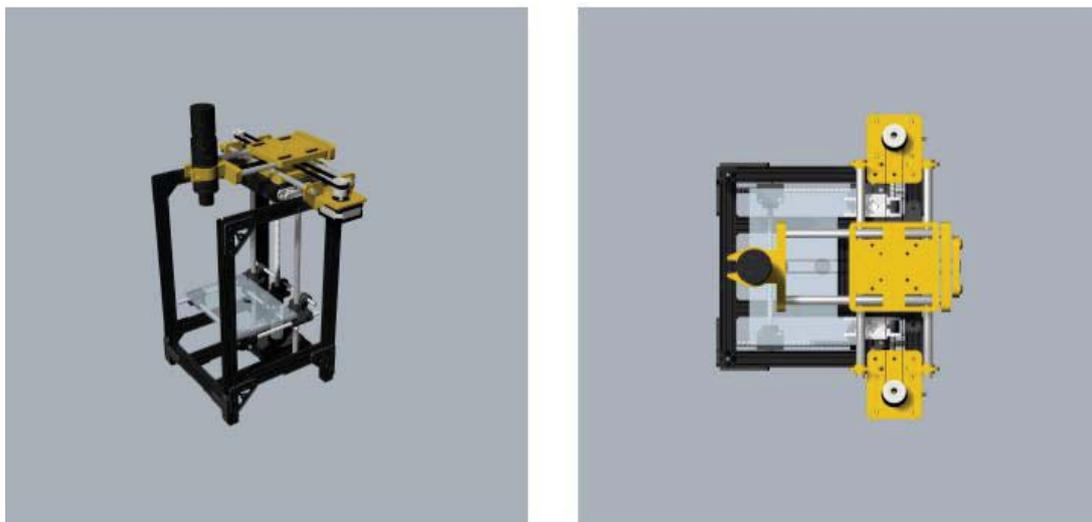
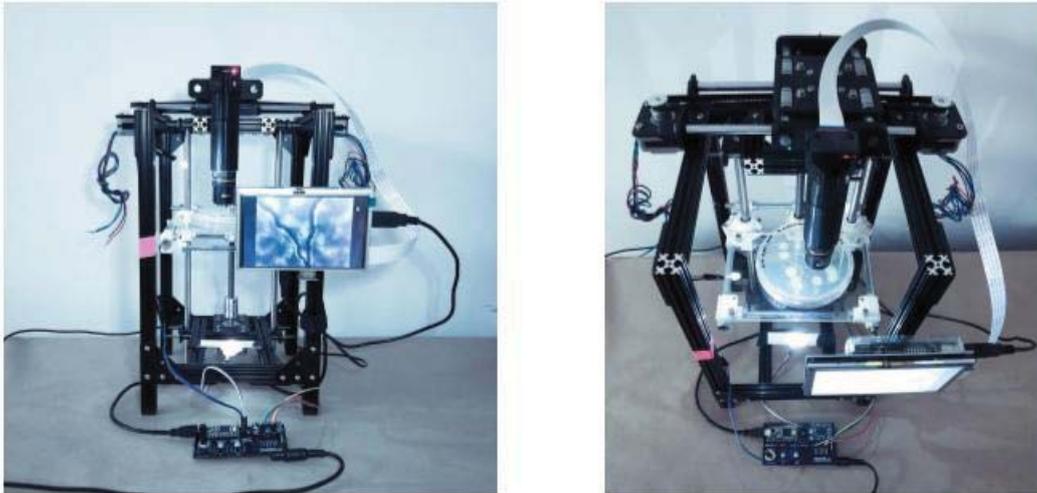


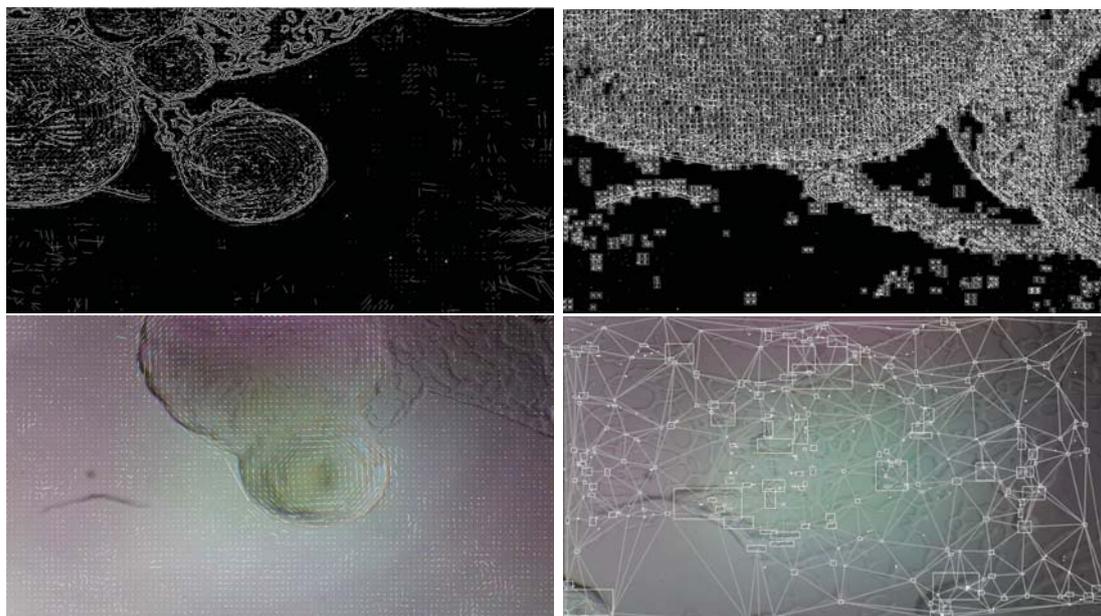
Figura 3.35: Planos CAD 3D del sistema de microscopía. En la figura de la derecha se muestra el sistema x-y para desplazar el objetivo a lo largo de la placa.

<sup>xv</sup><https://github.com/interspecifics/ComunicacionesEspeculativas>



**Figura 3.36:** Sistema de microscopía construido durante un taller impartido por Interspecifics en el C3-UNAM. Actualmente este microscopio se encuentra en el Peña-Miller Lab del CCG-UNAM.

El sistema de imagen de la RaspberryPi puede funcionar a la vez como un sistema para ejecutar *time-lapses* y a la vez para procesar la información de las imágenes mediante un sistema de visión por computador. El sistema puede operar en diversas modalidades a través de distintos algoritmos tanto en Python a través de la librería `opencv2` o fuera de la RaspberryPi en `OpenFrameworks`. En la imagen 3.37 se muestran diferentes métodos de análisis de imagen.

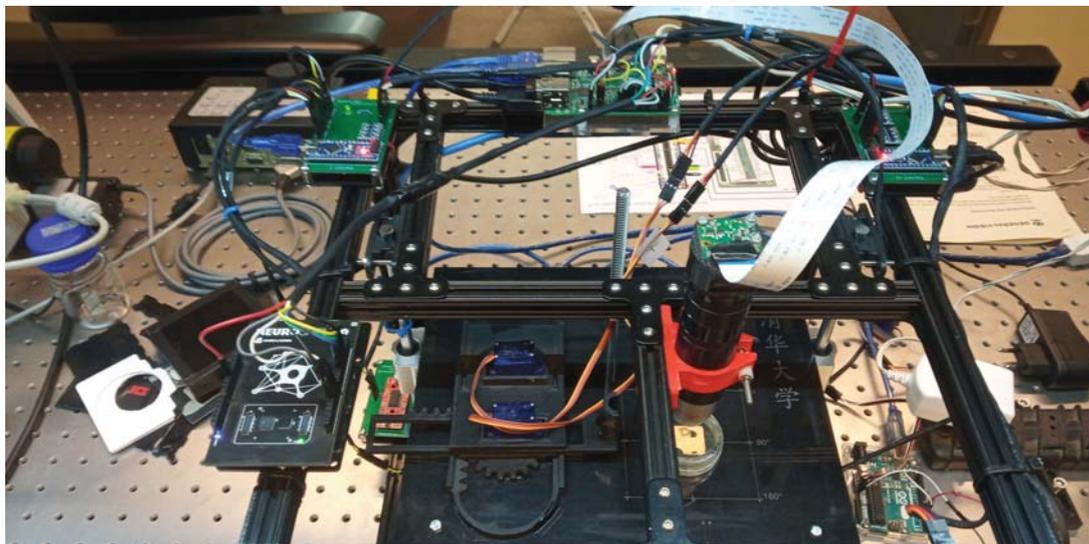


**Figura 3.37:** Diferentes sistemas de análisis de visión por computador: detección de contornos, detección de rumbos, detección de flujo y detección de *blobs*, de arriba abajo respectivamente.

En el caso del sistema basado en `OpenFrameworks` éste permite mandar los diversos datos obtenidos de visión por computador a través del protocolo `OSC`, para que éstos sean utilizados en una plataforma externa como datos para una sonificación de los patrones de crecimiento de las bacterias. No obstante antes de este paso, en el que genera una composición que responde a las lógicas de crecimiento del cultivo, se han implementado dos metodologías para extraer información del crecimiento de los cultivos de manera recursiva. Éstas se basan técnicas que utilizan algoritmos de *machine learning* y se utilizan para ejecutar tareas de clasificación de patrones.

El primer sistema de *machine learning*, implementado por Interspecifics, utiliza el coprocesador TPU Coral de Google para RaspberryPi junto a un algoritmo de *deep learning* en TensorFlow en Python, entrenado para detectar patrones recursivos mediante la alimentación de *streams* de vídeo durante el crecimiento de las colonias de bacterias. El segundo sistema, que se empezó a implementar en el KeymerLab, utiliza un sistema de *machine learning* basado NeuroShield (ver figura 3.38), una red neuronal digital de 576

neuronas en un *shield* de Arduino. Mediante la librería *NeuroMem* se puede enseñar a las neuronas a reconocer patrones de vídeo mediante aprendizaje asistido.



**Figura 3.38:** Sistema NeuroShield (izquierda de la imagen) acoplado (RaspberryPi) al sistema de microscopía OpenScope del KeymerLab, similar al microscopio de Comunicaciones Especulativas. Este sistema permite enseñar a un sistema de neuronas digitales para monitorear el surgimiento de ciertos patrones clasificados con anterioridad.

Una vez el sistema de *machine learning* detecta un patrón, dentro de un conjunto de patrones posibles con los que el sistema ha sido entrenado, se asignan modalidades de sonificación específicas para cada uno de los eventos en particular. Así por ejemplo, si el sistema detecta una forma de crecimiento determinada en el cultivo, este evento dispara un conjunto de valores correspondientes a un determinado mapeo de síntesis de audio.

En este momento el proyecto de *Comunicaciones Especulativas* se encuentra en este punto de desarrollo. No obstante el sistema completo a desarrollar en el futuro incluye, paralelamente al dispositivo de síntesis de audio, un sistema de inteligencia artificial acoplado al cultivo de bacterias. En la próxima sección discutimos brevemente el trabajo a futuro.

### 3.4.2. Retroalimentación del Sistema

Recapitulando, en este punto el sistema permite, a partir de un cultivo de bacterias, capturar la información a nivel de imagen y de vídeo de este cultivo y de su evolución en el tiempo. Esta información procesada mediante visión por computador, alimenta un algoritmo de aprendizaje capaz de clasificar eventos correspondientes a diferentes patrones de crecimiento, lo cual a su vez genera una composición sonora determinada que va evolucionando con el tiempo. En este punto para cerrar el *loop* de comunicación entre la máquina y el sistema biológico falta generar una retroalimentación de la máquina hacia el cultivo de bacterias.

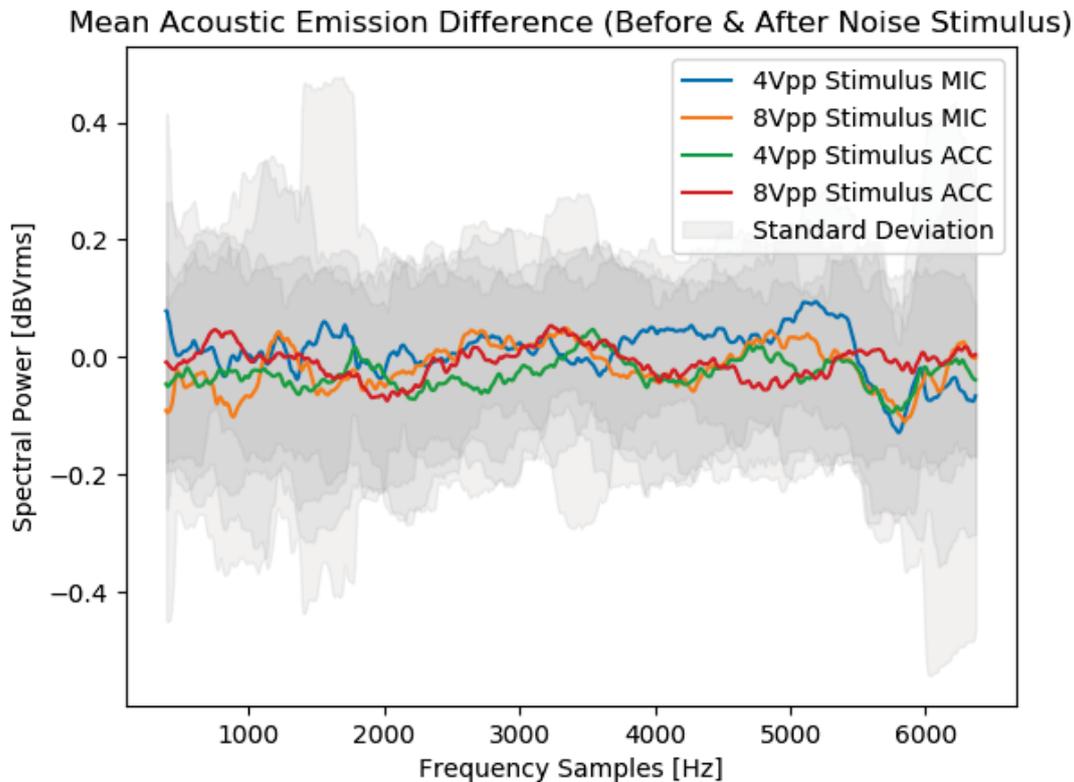
Esta retroalimentación se genera a partir de una inteligencia artificial, la cual tiene el poder de decidir que acción tomar en función de los patrones extraídos mediante los algoritmos de *computer vision*. En este punto existen varios modos posibles a partir de los cuales el sistema puede tomar una decisión que afecte al cultivo de bacterias. Una de estas posibilidades es, partiendo del estudio de la emisión acústica en colonias de bacterias, utilizar el sonido como elemento externo para condicionar el crecimiento de éstas.

De esta manera, paralelamente a los experimentos de medición de emisiones acústicas en colonias de bacterias *P. Dendritiformis*, se realizaron experimentos dentro de la cámara anecoica de la UNAM alrededor de la influencia que tiene el sonido sobre el cultivo de estas bacterias. Para ello en estos experimentos se dispuso un monitor de estudio activo de 3" a una distancia de aproximadamente 15cm de la placa de petri inoculada con cultivos de *P. Dendritiformis* (1% agar, 0,1g/l peptona, séptimo día de crecimiento en incubadora a 37C). Mediante un generador de funciones (DS345, Standford Research) externo a la cámara anecoica se aplicaron señales de ruido blanco a amplitudes de 4V<sub>pp</sub> y 8V<sub>pp</sub>. Después de la estimulación mediante ruido blanco durante un periodo de 5min para cada una de las dos amplitudes, se hicieron grabaciones y se analizó el espectro de audio durante un período de 5min mediante el sistema de microfónica y el acelerómetro 3.39.



**Figura 3.39:** Sistema experimental para determinar la influencia de sonido externo en la emisión acústica de colonias de bacterias dentro de la cámara anecoica de la UNAM.

Los resultados obtenidos a partir de los análisis de los espectros de audio (consultar anexo C) después de la estimulación sonora a través de ruido blanco no muestran ninguna respuesta acústica generada en la colonia de bacterias en los momentos posteriores a la estimulación. En la figura 3.40 podemos observar un espectro plano tanto para el caso de los datos obtenidos con el micrófono como para el acelerómetro, y tanto para la estimulación de  $4V_{pp}$  como la de  $8V_{pp}$  (con todas los datos previamente calibrados respecto a los datos del experimento de control). Igualmente después de una inspección visual en el momento y durante los días posteriores al experimento no se observó ninguna desviación morfológica en el crecimiento de este cultivo.



**Figura 3.40:** Datos de las emisiones acústicas captadas con el micrófono y acelerómetro en *P. Dendritiformis* después de la estimulación sonora externa con ruido blanco a dos amplitudes diferentes.

Aunque estos experimentos preliminares no confirmen la posible influencia del sonido en el crecimiento de las colonias de bacterias, éstos son muy acotados ya que solo exploran la influencia de un tipo de sonido (ruido blanco). Así de esta manera se podrían realizar más experimentos en un futuro que incluyeran otros tipos de estimulación acústica mediante la exploración de otras variables tales como los tipos de funciones de onda, de frecuencias, de amplitudes y de sistemas de emisión sonoros, como por ejemplos altavoces piezoeléctricos adheridos en distintas posiciones del cultivo.

En este punto, como sistema de retroalimentación entre la máquina y el cultivo, se pueden plantear otros mecanismos de estimulación tales como: estimulación química mediante nutrientes o mediante antibióticos, o bien estimulación mediante luz u otros campos de radiación electromagnéticos en general. Por otro lado la estimulación puede ser de valencia

positiva, i.e. propiciar el crecimiento del cultivo, o bien de valencia negativa, i.e. inhibir el crecimiento del cultivo. Ambas estimulaciones pueden operar en un mismo sistema y de alguna manera, en función de los patrones de crecimiento de cultivo, la inteligencia artificial puede seleccionar que tipo de valencia aplicar a manera de retroalimentación al cultivo de bacterias en un determinado momento y en un determinado punto espacial de la colonia.

Mediante estos mecanismos de estimulación ambivalentes (similares a los de los experimentos de aprendizaje por refuerzo dentro del campo de la psicología conductivista) y accionados por la inteligencia artificial a lo largo del tiempo, el cultivo a su vez irá modificando su crecimiento en respuesta. Así a partir de esta dinámica acoplada se genera una coevolución máquina - microorganismo que puede llegar a evolucionar como un sistema híbrido, el cual si tuviera los suficientes recursos energéticos y de nutrientes, podría existir y perdurar en el tiempo de manera autónoma y como una entidad *cyborg* propia.

Existen distintos escenarios o posibles dinámicas emergentes en esta coevolución, de las cuales quizá una de las más interesantes sea la respuesta a la pregunta de si el cultivo de bacterias puede llegar a anticipar las decisiones de la máquina en algún momento.

Finalmente solo planteamos la posibilidad de un sistema ampliado al de *Comunicaciones Especulativas* en el cual las bacterias puedan generar un estímulo, tanto de valencia positiva como negativa, dirigido hacia la inteligencia artificial, creando a la vez un sistema ambidireccional de retroalimentación máquina  $\rightleftharpoons$  bacteria (más equitativo). Dicho sistema podría consistir tentativamente de un cultivo de bacterias capaces de mantener señalizaciones de carácter eléctrico, tal como las bacterias *Geobacter*, creciendo en el mismo hábitat que el chip de neuronas digitales de la inteligencia artificial. Así de esta manera se podría ensamblar un sistema en el que los pilis eléctricos de *Geobacter* interfirieran constructiva o destructivamente con el circuito eléctrico a modo de estímulo positivo o negativo.

## Capítulo 4

# Especulaciones Acústicas: Quimeras Mecánicas y Oscilaciones Bariónicas

A lo largo del capítulo 1 hemos explorado la fenomenología de ciertos ritmos que surgen en diversos sistemas naturales y que se manifiestan específicamente dentro de los ámbitos sonoros. Igualmente hemos propuesto diferentes técnicas de análisis para intentar cuantificarlos y categorizarlos a partir de los patrones que manifiestan dentro de los dominios temporales. Por otro lado, de la amplia gama de morfologías temporales que hemos indagado, en los capítulos 2 y 3 nos hemos centrado en el estudio específico de ciertos fenómenos oscilatorios pertenecientes al dominio taxonómico de las bacterias.

En este capítulo final, a modo de conclusión y por completitud, nos trasladaremos de las escalas de descripción espaciales *micro* hacia los terrenos *meso* y *macro*, procurando una visión panorámica, aunque no por eso representativa, compuesta últimamente de dos sistemas físicos en los que la emergencia de geometrías temporales conforma similarmente estructuras conferidas a fenómenos dentro de los ámbitos sonoros.

Así primeramente partiremos de la escala *meso* mediante la descripción de un fenómeno particular de sincronización conocido como quimera, aplicado al caso específico de un sistema mecánico compuesto por metrónomos acoplados. Finalmente, dentro de la escala *macro* cosmológica, estudiaremos el fenómeno de oscilaciones bariónicas acústi-



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

cas (BAO, *Baryonic Acoustic Oscillations*) asociado a la radiación de fondo microondas (CMB, *Cosmic Microwave Background*).

## 4.1. Quimeras Acústicas en un Sistema de Metrónomos Acoplados

Los fenómenos de sincronización, los cuales hemos visto que aparecen naturalmente en una multiplicidad de sistemas asociados con procesos físicos, químicos y biológicos (tal como luciérnagas, aplausos, grillos, etc. Ver capítulo 1), se pueden definir esencialmente como una combinación de dos o más sistemas cuyos comportamientos siguen el mismo patrón.

Tal como mencionábamos al final del capítulo 2, Huygens fue el primer científico que indagó este fenómeno en el año 1665, a partir de las oscilaciones de dos relojes de péndulo sostenidos por una misma base. El análisis de esas investigaciones se centraba en la sincronización en frecuencia de esos péndulos, tanto en fase como en antifase. Huygens nombró a ese fenómeno de sincronización como “simpatía entre relojes”<sup>1</sup>[252].

Por otro lado, las primeras investigaciones matemáticas alrededor de la sincronización se deben a Wiener en el año 1966, quien desarrolló un modelo para sistemas neuronales, basado en integrales de Fourier, obteniendo una distribución de frecuencia similar a los ritmos  $\alpha$  del cerebro [253]. Winfree un año más tarde reformuló el problema en términos de una población extensa de osciladores de ciclo límite acoplados, permitiendo la observación de sincronía en periodos largos de tiempo [163]. Finalmente Kuramoto en el año 1975 propuso una manera estandarizada para cuantificar los estados de sincronía en los sistemas a partir del uso de un parámetro de orden [254].

Pasados más de 25 años Kuramoto, investigando anillos de osciladores idénticamen-

---

<sup>1</sup>Es interesante consultar la obra de Huygens “*Horologium Oscillatorium: sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*”, la cual está dedicada al análisis de los movimientos de los péndulos y relojes. Recordemos que Huygens inventó el reloj de péndulo, y que éste fue el mecanismo más preciso para medir el tiempo durante 300 años.

te acoplados, encontró un resultado interesante en el que algunos de los osciladores del sistema alcanzaban estados de sincronía mientras que otros permanecían desincronizados [255]. Este fenómeno de ruptura de simetría fue nombrado posteriormente en 2008 por Abrams y Strogatz como un estado quimera (en referencia a la criatura mitológica híbrida con cabeza de león, cuerpo de cabra y cola de dragón), y definido formalmente como una ruptura de simetría en osciladores idénticos con acoples simétricos [256]. Este comportamiento resultó inicialmente contraintuitivo, ya que la sincronización parcial sólo se había observado anteriormente en 2006 en sistemas con una topología asimétrica o bien utilizando osciladores diferentes [257]. Así de esta manera, los estados quimera se pueden entender como patrones dinámicos complejos en sistemas con osciladores simétricos y con una topología regular [258].

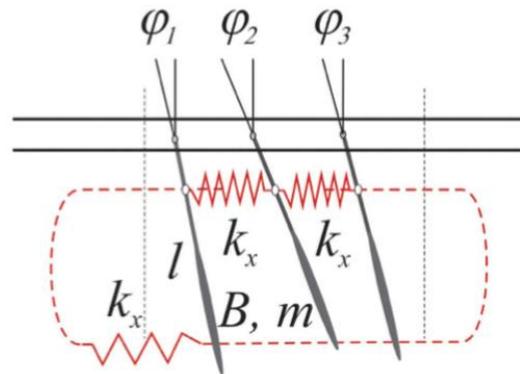
A partir de estos trabajos pioneros los estados quimera se observaron en una diversidad de situaciones pero siempre dentro de los campos de análisis teóricos. No es sino a partir de 2012, en que dos experimentos basados en reacciones químicas fotosensitivas, que se logró encontrar dichos estados experimentalmente [259][260]. Después de eso se encontraron estados quimera experimentalmente en sistemas mecánicos compuestos de metrónomos acoplados [261], y posteriormente se logró reducir este sistema a tres metrónomos, encontrando así el estado quimera mínimo en sistemas mecánicos [262].

Precisamente este último sistema, en el cual dos de los osciladores están en sincronía mientras que el restante está fuera de sincronía, es el que analizaremos más en profundidad en la sección siguiente, y el cual orientaremos hacia una propuesta de instalación sonora ideada para percibir los patrones de los estados quimera desde una perspectiva sonora.

#### **4.1.1. Quimeras Mecánicas Mínimas**

En la actualidad existen diferentes sistemas experimentales para estudiar el fenómeno de estados quimera (sistemas de osciladores optoelectrónicos, uniones de Josephson, etc.)[258]. No obstante los sistemas mecánicos permiten la realización experimental de dichos estados de una forma relativamente sencilla. Por otro lado el uso específico de me-

trónomos, dentro de dichos sistemas, permite mantener un comportamiento autosostenido en el sistema gracias a los mecanismos de cuerda, capaces de almacenar energía mecánica.



**Figura 4.1:** Sistema mecánico mínimo capaz de producir quimeras compuesto de tres metrónomos acoplados entre sí . En rojo se muestra los acoplamientos entre péndulos mediante resortes con coeficientes de rigidez  $k_x$  [262].

El sistema del cual partimos para proponer nuestra instalación sonora es el sistema mínimo más sencillo, compuesto de 3 metrónomos acoplados entre si mediante muelles y representado en la figura 4.1. Este sistema viene determinado por 3 péndulos de longitud  $l$ , masa  $m$  y momento de inercia  $B$ , acoplados a primeros vecinos a través de un muelle lineal con coeficiente de rigidez  $k_x$  y con amortiguadores lineales con coeficiente de amortiguamiento  $c_x$ . Los desplazamientos de los péndulos vienen determinados por los ángulos  $\phi_i$ . Los muelles y amortiguadores están conectados a cada uno de los péndulos a una distancia  $l_s$  del pivote de los péndulos. Igualmente el movimiento de los péndulos se amortigua debido al amortiguador lineal, caracterizado por el coeficiente  $c_\phi$ . La energía se transmite hacia cada péndulo debido al mecanismo de escape, el cual genera un torque de excitación  $M_D$ .

Así de esta manera la dinámica del sistema viene determinada por la siguiente ecuación:

$$B\ddot{\phi}_i + c_\phi \dot{\phi}_i + mgl \sin \phi_i + k_x l_s^2 (\phi_i - \phi_{i-1}) + k_x l_s^2 (\phi_i - \phi_{i+1}) + c_x l_s^2 (\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_{i-1}) + c_x l_s^2 (\dot{\phi}_i - \dot{\phi}_{i+1}) = M_D, \quad (4.1)$$

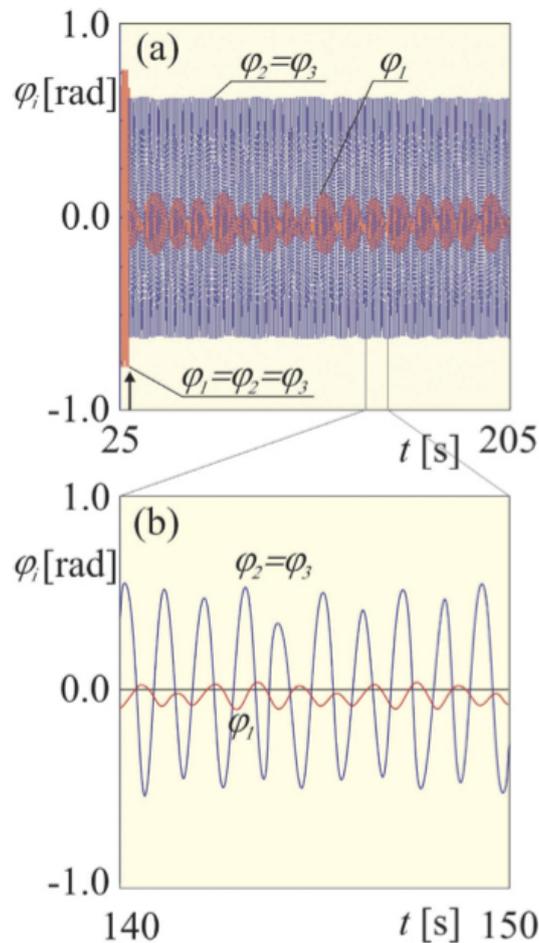
donde  $i = 1, 2, 3$ ,  $\phi_0 = \phi_n$ ,  $\phi_{n+1} = \phi_1$ . El sistema descrito por 4.1 es un sistema simétrico en el anillo ya que cada péndulo  $i$  está acoplado con el péndulo  $i + 1$  e  $i - 1$  a través de un acoplamiento local.

Las series de tiempo obtenidas de la simulación numérica de la ecuación 4.1, utilizando el método de integración numérica de Runge-Kutta de cuarto orden [262], muestran el estado de quimera con dos de los péndulos manteniendo un estado de sincronía con  $\phi_2 = \phi_3$ , mientras que el otro péndulo se mantiene fuera de fase respecto a los anteriores con  $\phi_1$  y con un desplazamiento mínimo cerca de su punto de equilibrio (ver figura 4.2).

Experimentalmente también se observa el repertorio completo de estados posibles del sistema, los cuales comprenden: (i) la sincronización de los 3 péndulos, (ii) la sincronización parcial de las fases con dos péndulos oscilando en antifase y el tercero en reposo, y (iii) el estado quimera mínimo con dos péndulos oscilando en fase y el tercero fuera de fase.

### 4.1.2. Instalación Sonora de Quimeras Acústicas

Todos los estudios de quimeras mecánicas que existen en la literatura se centran en el análisis experimental de los estados quimera mediante dispositivos de captación de datos basados en vídeo. Normalmente en estos estudios se disponen marcadores fluorescentes en los extremos de la barra del metrónomo de tal manera que los ángulos de desplazamiento se pueden *trackear* en el tiempo. No obstante, una de las propiedades inherentes en los metrónomos es que éstos generan una emisión acústica en forma de *tick* cuando su amplitud de oscilación se encuentra en un máximo. Una consecuencia directa de este comportamiento es que se pueden utilizar las señales resultantes de la emisión acústica



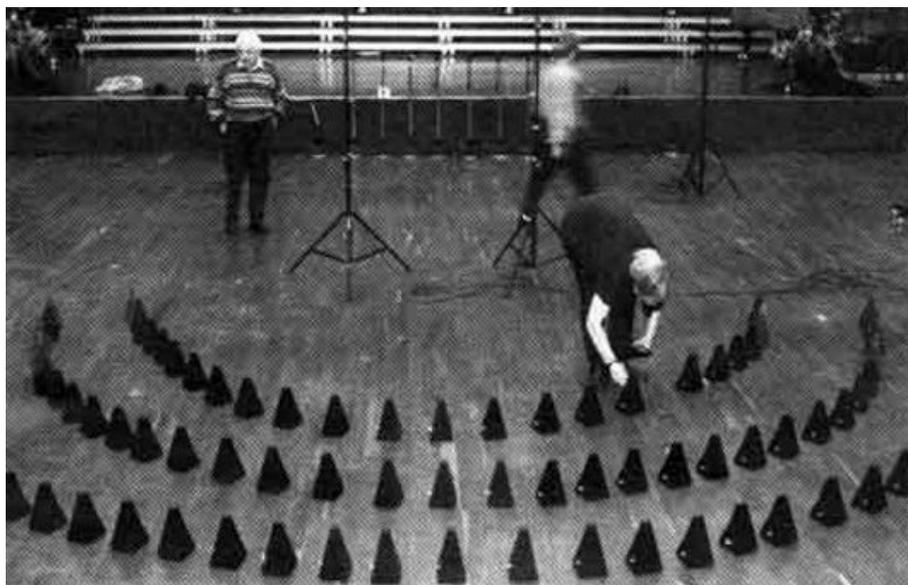
**Figura 4.2:** Partiendo de un estado de sincronía con  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$  se llega con el tiempo a un estado donde dos de las fases de desplazamiento son iguales  $\phi_2 = \phi_3$  y la restante es diferente  $\phi_1$ , logrando un estado quimera con dos metrónomos en sincronía y uno fuera de ésta [262].

de cada uno de los *ticks*, provenientes de cada uno de los metrónomos, para analizar los estados quimera desde los dominios sonoros y no visuales.

Por este motivo en esta sección presentamos un sistema enfocado en esta dirección y orientado a un formato de instalación sonora. Históricamente cabe reseñar la obra “Poème Symphonique für 100 Metronome” de György Ligeti en 1962. Esta obra forma parte de los *event-scores* (partituras de sucesos) y está adscrita al movimiento artístico Fluxus <sup>11</sup>. Los 100 metrónomos, preparados a distintas velocidades y con la cuerda al máximo, se

<sup>11</sup>Vídeo de la escultura sonora de Ligeti, donde en este caso los 100 metrónomos se accionan mediante un dispositivo mecánico. <https://www.youtube.com/watch?v=-mUv705xj3U>

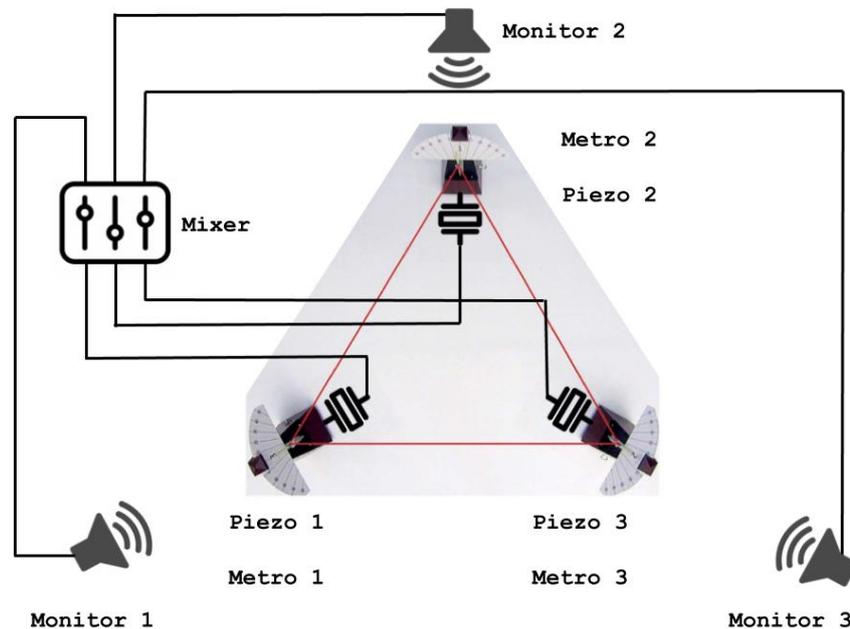
ubican en una plataforma (ver figura 4.3). Para su ejecución diez intérpretes, cada uno de ellos encargado de diez metrónomos, los inician sincronizadamente a la señal del director. A medida que a los metrónomos se les va la cuerda, se van deteniendo uno tras otro. De esta manera la periodicidad en el sonido se hace perceptible y con el tiempo se empieza a distinguir un metrónomo de otro. La pieza suele terminar con un único metrónomo oscilando durante unos pocos pulsos seguido por silencio [263].



**Figura 4.3:** Instalación escénica de la obra de Ligeti para 100 metrónomos.

En la obra de Ligeti ninguno de los metrónomos están acoplados entre ellos y por ende no hay ningún mecanismo global de sincronización de los ritmos. En nuestro caso proponemos una instalación basada en el sistema mínimo de estados quimera descrito anteriormente y compuesto por 3 metrónomos acoplados entre sí (ver figura 4.4). Para amplificar la señal de los *ticks*, a cada uno de los metrónomos se les acopla un micrófono piezoeléctrico situado en el dorso de la caja de resonancia. La señal acústica de los 3 piezoeléctricos se dirige a la entrada de 3 canales separados en una mezcladora y éstos a 3 salidas de audio compuestas por 3 monitores de audio.

Finalmente recalcar que esta instalación permite percibir de una manera sonora los patrones resultantes de los estados quimera de sincronización y desincronización coetáneos, existentes en un sistema simétrico mínimo de tres péndulos acoplados entre si mediante



**Figura 4.4:** Diagrama de la instalación de tres metrónomos acoplados entre si mediante resortes. En la caja de resonancia de cada metrónomo se dispone de un micrófono tipo piezoeléctrico para amplificar la señal del *click* evitando así la interferencia acústica de los otros metrónomos.

resortes mecánicos idénticos.

### 4.1.3. Simulaciones Numéricas de Péndulos Acoplados

Otra manera posible para investigar las dinámicas espaciales y temporales en sistemas de péndulos mecánicos es a partir de simulaciones numéricas. Para ello en esta sección desarrollamos un software que nos permite explorar tanto visualmente como acústicamente las dinámicas en un sistema compuesto por varios osciladores.

El programa en cuestión, escrito en Processing, dispone de una interfaz gráfica (GUI) que nos permite visualizar las dinámicas de 20 a 40 osciladores. La amplitud de cada uno de los osciladores, representada por puntos blancos, se visualiza en el eje *xPos* y se calcula mediante el siguiente algoritmo:

```

1 void calculatePositions(){
2   positionx = new float[totalPen];

```

```

3   for (int i = 0; i < totalPen; i++){
4       yPos = (i+1) * ((float)boxHeight/(totalPen+1)) + 25;
5       if(alignSin==true){
6           xPos = xCenter + amplitud * sin(frequencies[i]*timeValue*two_pi);
7       } else {
8           xPos = xCenter + amplitud * cos(frequencies[i]*timeValue*two_pi);
9       }
10      positionsx[i] = xPos;
11      positions[i] = new PVector(xPos, yPos); }
12 }

```

Al primer péndulo del sistema se le adjudica la frecuencia de oscilación menor y a los péndulos subsiguientes se les aumenta progresivamente dicha frecuencia a partir de una constante de proporcionalidad, que en nuestro caso toma el valor `freqMult=0,001`.

```

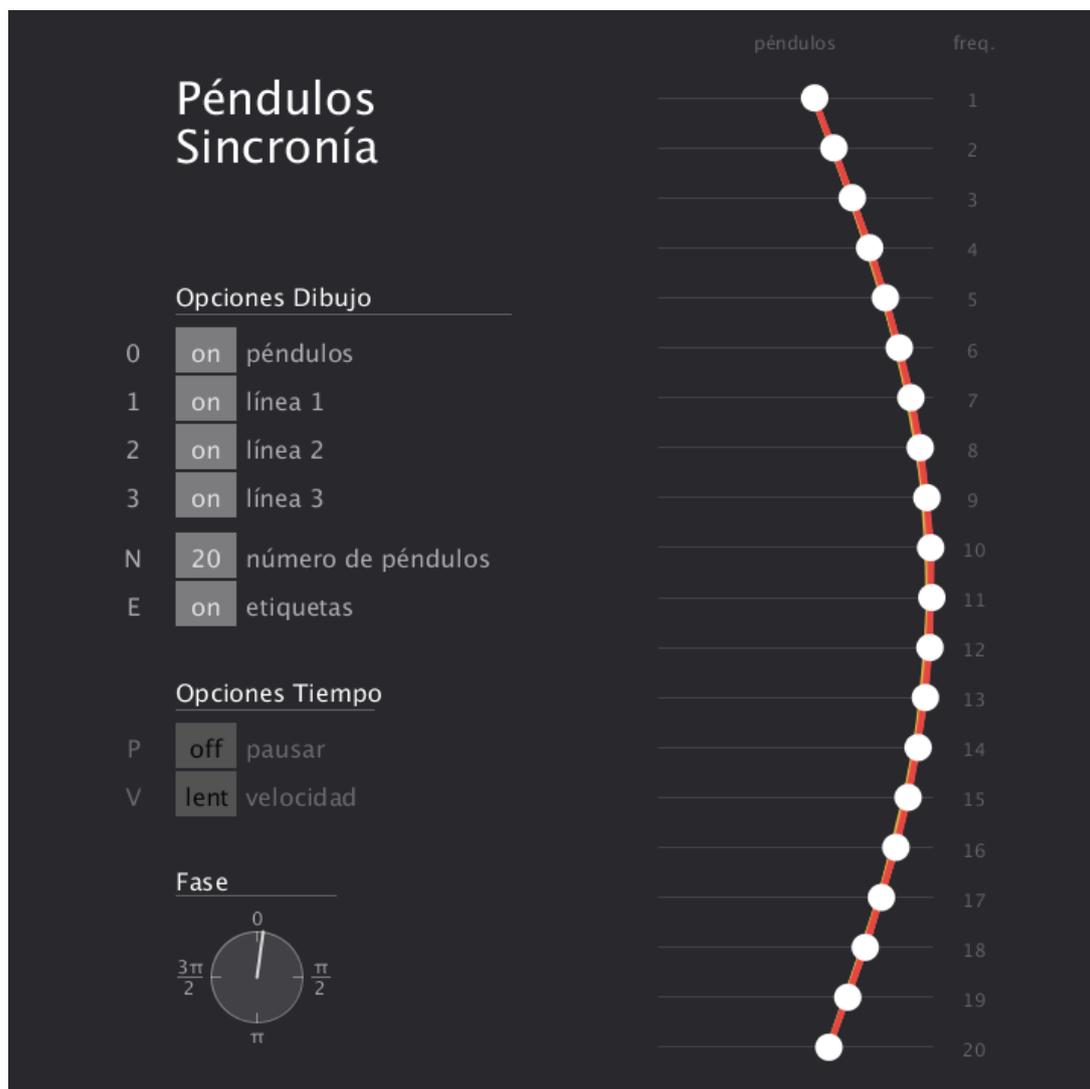
1   for (int i = 0; i < totalPen; i++){
2       frequencies[i] = (i+1) * freqMult; }

```

El algoritmo por lo tanto reproduce un sistema donde cada uno de los osciladores oscila independientemente con una frecuencia natural determinada. No obstante debido a la relación lineal entre el número de péndulos y sus frecuencias, el sistema puede representar un sistema con una única frecuencia natural, la cual mediante constantes de acople entre vecinos genera una dinámica de amortiguación progresiva.

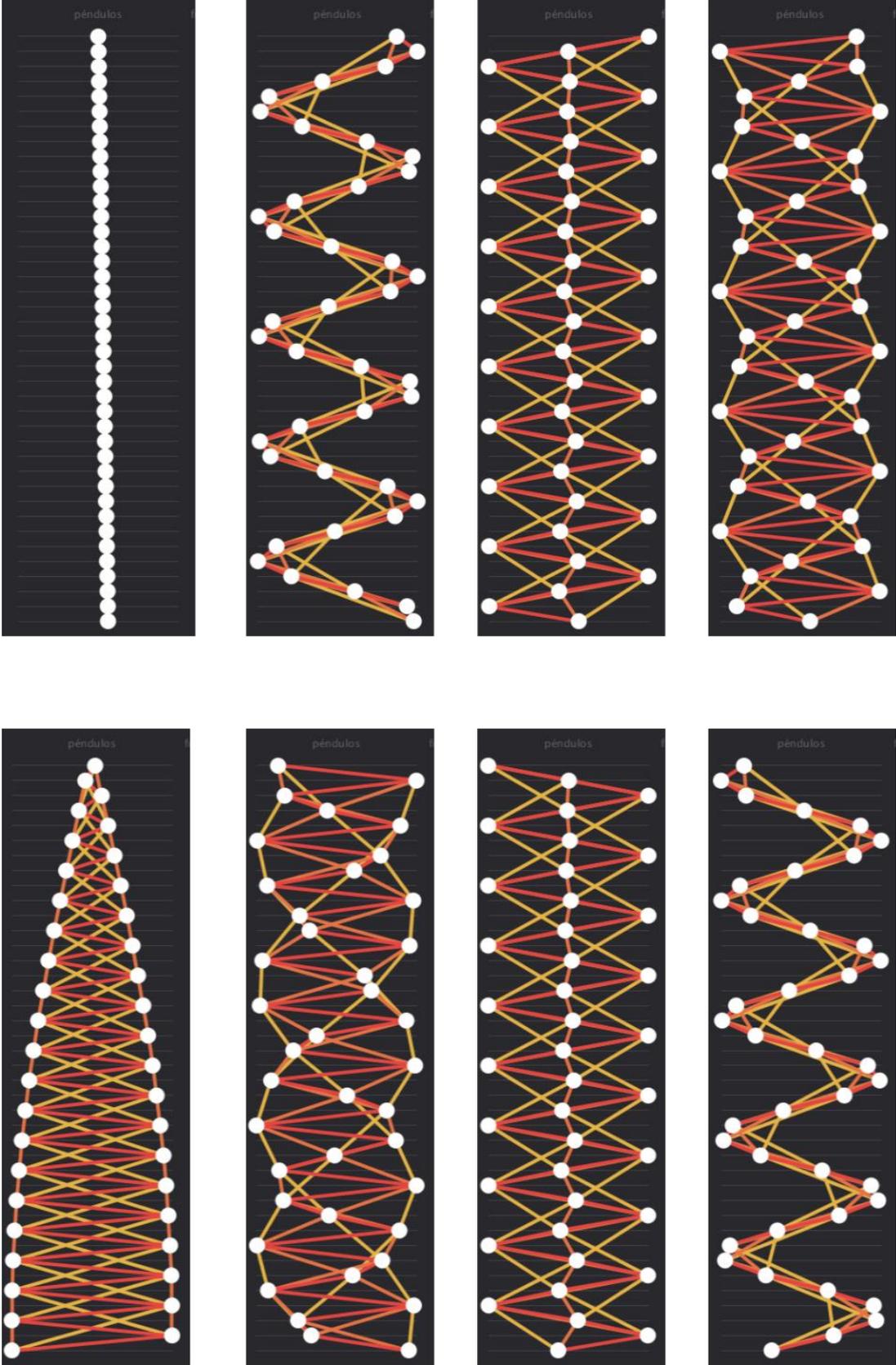
Por otro lado, la GUI (ver figura D.2) dispone de tres secciones. La sección “*Opciones de Dibujo*” permite activar o desactivar la visualización de los péndulos, y de las líneas de unión entre ellos a primeros vecinos (rojo), segundos (naranja) y a terceros (amarillo). Igualmente dicha sección permite seleccionar el número de péndulos (20 – 40) y sus etiquetas. La sección “*Opciones de Tiempo*” permite pausar y reanudar la reproducción del sistema y cambiar entre dos velocidades de reproducción (rápida, lenta). La sección inferior “*Fase*” muestra la fase global del sistema en radianes.

Para la sonificación de este sistema utilizamos un programa externo *patcheado* en *Pure Data*. Este sistema recoge los datos de las amplitudes de 1 – 20 osciladores, enviados desde

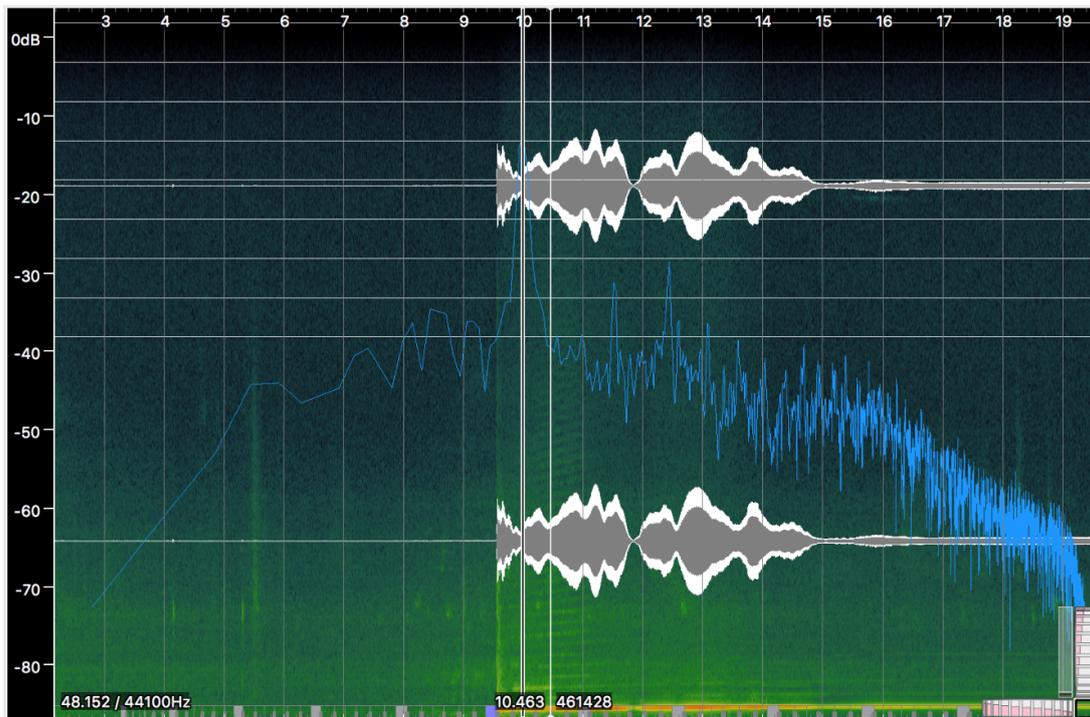


**Figura 4.5:** Pantallazo de la GUI del sistema, desplazado levemente de la fase inicial de 0 radianes.

Processing mediante OSC, y los transforma a una frecuencia de emisión determinada. De la multiplicidad de sonificaciones posibles para nuestro sistema programamos dos entornos. En el primero la posición de cada uno de los péndulos corresponde a una frecuencia variable de un oscilador sinusoidal (ver figura 4.7). En el segundo sistema emulamos un metrónomo con una frecuencia de emisión de un *tick* variable en función de la posición del péndulo. Finalmente los dos *patches* del código de sonificación y el código de visualización de los péndulos se anexan, por su extensión, en D.



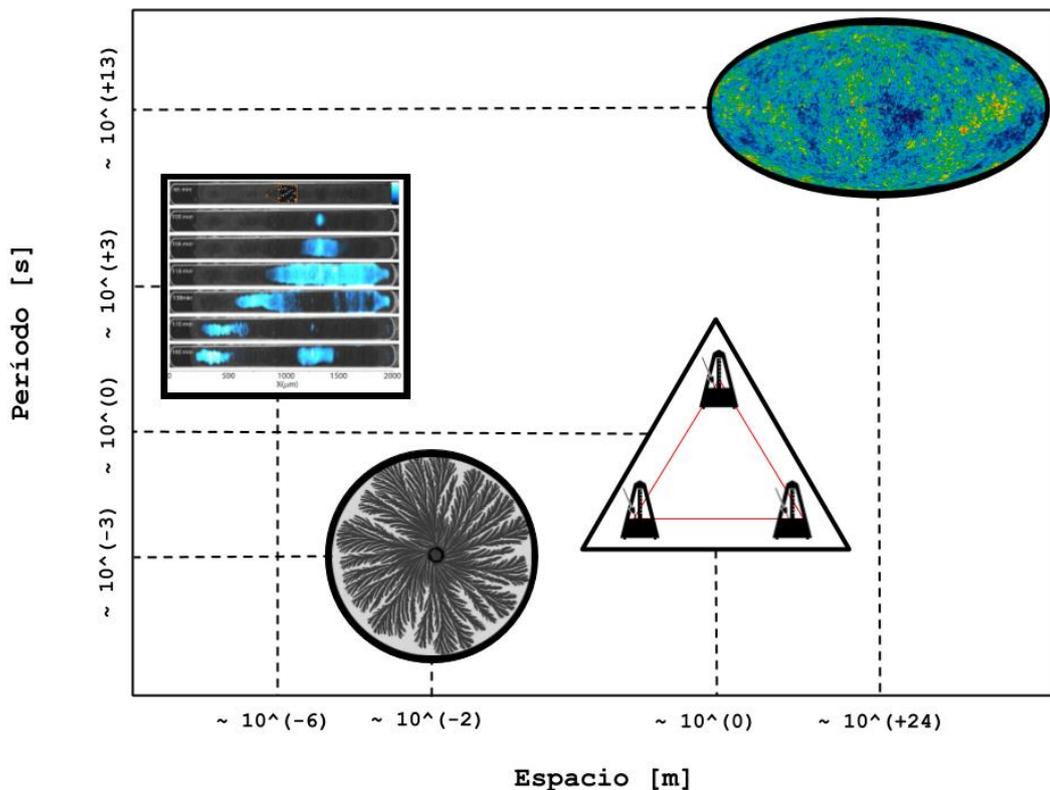
**Figura 4.6:** Pantallazos de las diferentes dinámicas obtenidas en el sistema en las fases aproximadas de:  $0$ ,  $\pi/4$ ,  $\pi/2$ ,  $3\pi/4$  y  $\pi$ ,  $\pi/2$ ,  $5\pi/4$ ,  $3\pi/2$ ,  $7\pi/4$  (de izquierda a derecha y de arriba abajo).



**Figura 4.7:** Forma de onda y espectrograma superpuesto correspondiente a la sonificación de 20 péndulos a partir de 20 osciladores sinusoidales de frecuencia variable. Se observa una línea de emisión espectral máxima alrededor de los  $10\text{kHz}$  correspondiente al estado de sincronía de fase en 0 radianes. (Análisis de señal hecha en Sonic Visualiser.)

## 4.2. Oscilaciones Bariónicas Acústicas

En esta penúltima sección de la tesis nos desplazamos un paso de gigante (ver figura 4.8), recorriendo espacio-temporalmente los patrones en construcciones genéticas que habitan en dispositivos de microfluídica, en crecimientos de colonias de bacterias y en sistemas acoplados de metrónomos, para situarnos finalmente en las escalas cosmológicas.



**Figura 4.8:** Vista panorámica de los distintos fenómenos estudiados a lo largo de esta tesis, emplazados en un diagrama orientativo de órdenes de magnitud en coordenadas espacio-temporales.

Así, partiendo de la pregunta que planteábamos al inicio de esta tesis con respecto a si era posible percibir y entender los conceptos de emergencia dentro del marco de los fenómenos sonoros, en este punto dirigimos nuestra atención hacia las estructuras de gran escala del Universo actual, para emplazarlas dentro del marco de los fenómenos acústicos a partir del análisis del fenómeno de oscilaciones bariónicas acústicas (BAO)<sup>III</sup>.

<sup>III</sup>Gran parte de los análisis presentados a continuación se basan en las 4 conferencias tituladas “The

El estudio de la formación de estructuras en cosmología se basa principalmente en datos observacionales extraídos de relevamientos del cielo (*sky surveys*), en mapeos de varias bandas de longitud de onda de radiación electromagnética y finalmente en modelos numéricos (ver figura 4.9)<sup>IV</sup>. La disposición de las estructuras parece seguir un modelo jerárquico en el cual, partiendo de las estrellas, éstas se organizan en galaxias, las cuales a la vez forman grupos de galaxias, *clusters* de galaxias, *superclusters*, hojas (*sheets*), paredes (*walls*) y filamentos (*filaments*). Más allá de estas últimas estructuras, a escalas que varían de los 30 a los 200 megaparsecs, parece que no existe una estructura continuada, fenómeno que se conoce en cosmología como el *Fin de la Grandeza*.

Específicamente la estructura a gran escala del Universo muestra una red de estructuras tridimensionales, conocida como red cósmica (*cosmic web*), en la cual se pueden observar esencialmente tres características. La primera es que la mayor parte del volumen de esa estructura reside en las regiones menos densas, la segunda es que la mayor parte de ese volumen está permeado por filamentos, y la tercera es que los grupos más densos están localizados en las intersecciones entre los filamentos. Estas observaciones a la vez han motivado una clasificación taxonómica de la red cósmica en: vacíos, filamentos y nudos.

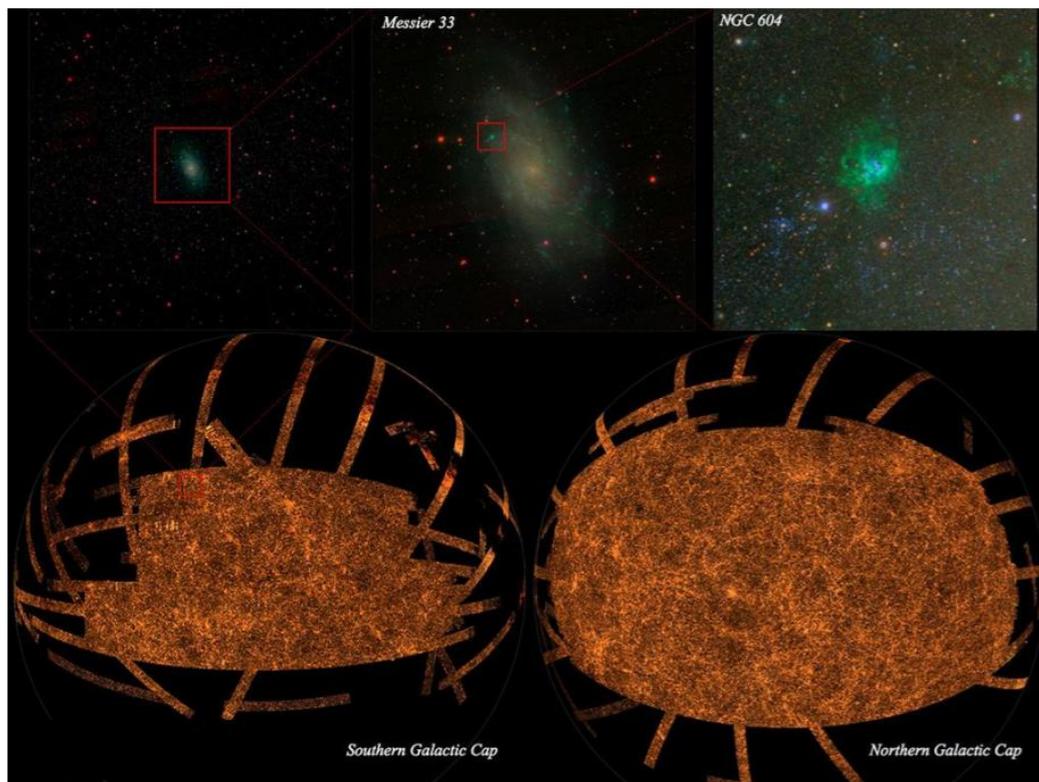
Esta red cósmica, inferida mediante las metodologías observacionales citadas anteriormente, a la vez se puede entender como una manifestación emergente de un colapso anisotrópico, a partir fluctuaciones iniciales en la densidad de la materia, y bajo los efectos de la gravedad a lo largo del tiempo [268].

Por otro lado, otras observaciones basadas en los datos provenientes de la radiación de fondo microondas (CMB), y en particular de las anisotropías detectadas en esta radiación, apuntan igualmente hacia el hecho que la vastedad de estructuras del Universo actual se formó mediante inestabilidades gravitacionales a partir de fluctuaciones mecanico-cuánticas cuando el Universo tenía una edad del orden de la fracción de segundo. Estas

---

Physics of the CMB and Large Scale Structure” de Matias Zaldarriaga hospedadas en el Insitute for Advanced Studies de Princeton (<https://video.ias.edu/pitp-2011-zaldarriaga1>).

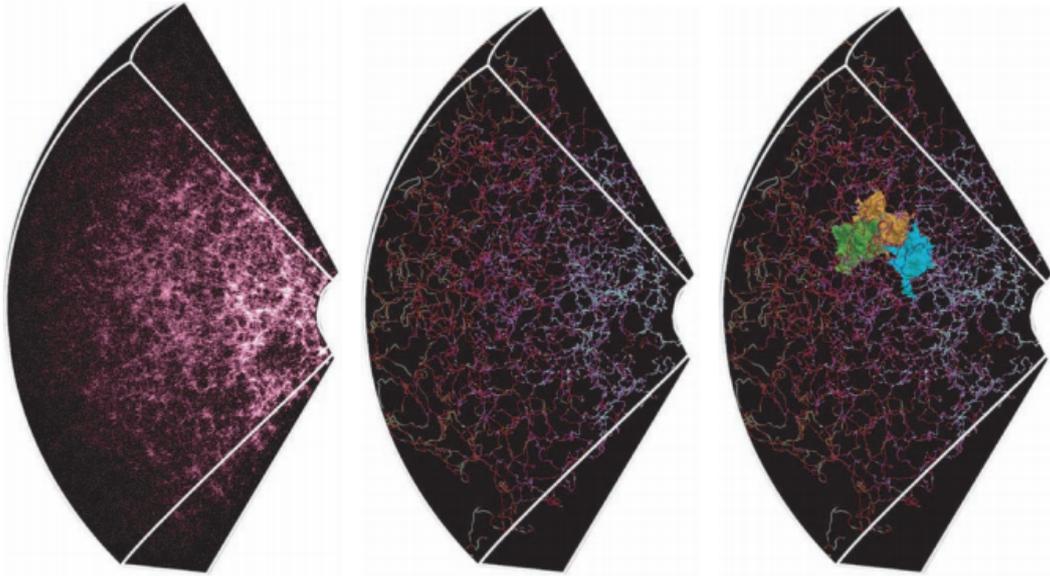
<sup>IV</sup>Como es bien sabido, a parte de los instrumentos de detección e.m. más usuales, recientemente dentro de la cosmología observacional se han empezado a obtener datos pertenecientes a ondas gravitacionales (LIGO-Virgo, 2016).



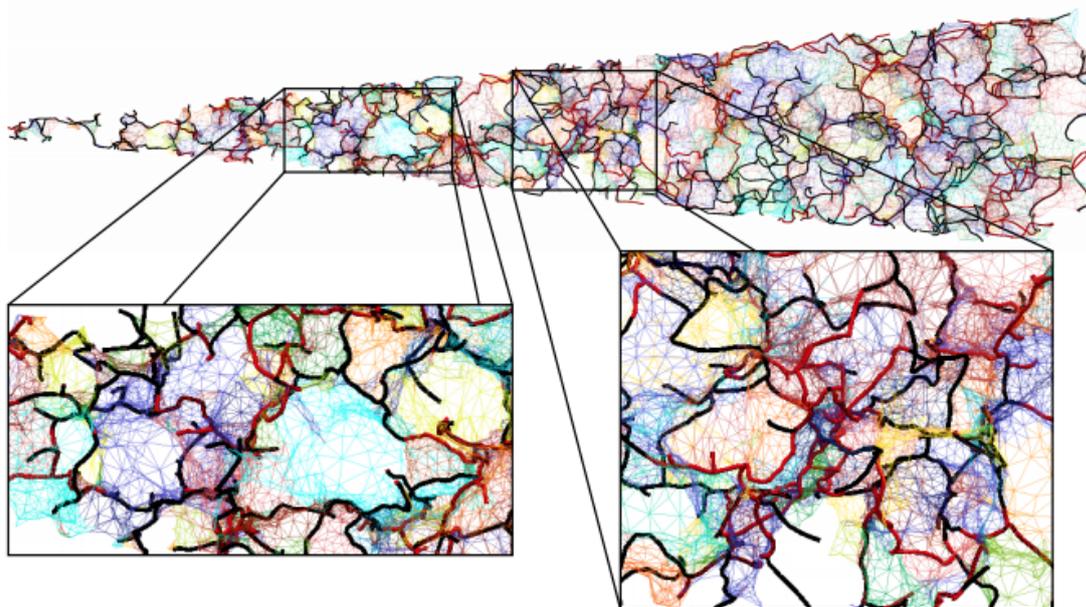
**Figura 4.9:** Imágenes del instrumento SDSS (Sloan Digital Sky Survey) que ilustran su resolución de datos, desde las estructuras de clusters y paredes, y ampliando a la galaxia del triángulo (M33) y de una región (NGC 604) de hidrógeno interestellar ionizado dentro de ésta [264].

observaciones, que vamos a estudiar con un poco más de detalle a continuación, validan a la vez y de manera más amplia un modelo estándar cosmológico del Big-Bang (conocido como  $\Lambda$ CDM, *Lambda Cold Dark Matter*<sup>v</sup>), donde el Universo se asume espacialmente plano, y consiste principalmente de materia oscura, energía oscura y de una pequeña porción de materia ordinaria, necesaria para explicar la abundancia de los elementos ligeros en éste [269].

<sup>v</sup>Éste representa el modelo más simple de concordancia con el Big-Bang.  $\Lambda$  indica la constante cosmológica como parte de un término de la energía oscura que permite conocer el valor actual de la expansión acelerada del Universo que se inició hace unos 6 mil millones de años. La materia oscura fría es el modelo de materia oscura en el que la velocidad de sus partículas es muy inferior a la velocidad de la luz, de ahí el adjetivo “fría”. La materia oscura fría es no-bariónica, a diferencia de la materia bariónica normal con la que no interacciona excepto mediante la gravedad. El modelo supone un espectro de invariancia de escala en las perturbaciones primordiales y un universo sin curvatura espacial.



(a) Datos experimentales del SDSS DR7 de una porción de cielo, extracción numérica de filamentos, y de tres vacíos (verde, ocre, azul) [265].



(b) Modelo numérico de extracción de estructuras de paredes (colores aleatorios) y de filamentos (negro y rojo) [266].

**Figura 4.10:** Datos y simulaciones numéricas de estructuras a gran escala. Según modelos numéricos se estima que la fracción de volumen ocupada por los vacíos es del 77 %, por las paredes de 18 %, por los filamentos de 6 % y por los nudos de  $> 0,1$  % [267].

### 4.2.1. Radiación de Fondo Microondas

La CMB es la forma de radiación electromagnética más antigua, remanente de la primera etapa del Universo, la cual llena todo el espacio y pertenece a la época de la recombinación, en la cual el Universo se enfrió lo suficiente para que los protones y electrones empezaran a formar átomos de hidrógeno neutro. Esta radiación descubierta (accidentalmente) en 1964 por Penzias y Wilson, posee el mismo espectro de emisión que un cuerpo negro ideal, con una radiación de energía térmica uniforme e isotrópica, proveniente de todas las partes del cielo y con una desviación menor de una parte entre  $10^5$ .

Tal como indica la ley de Planck, la radiación de cuerpo negro tiene la propiedad de depender exclusivamente de un sólo parámetro: la temperatura  $T_\gamma$ , perteneciente en nuestro caso a un gas de fotones en equilibrio termodinámico. Dicha temperatura, medida experimentalmente, corresponde a:

$$T_\gamma = 2,72548 \pm 0,00057K. \quad (4.2)$$

De acuerdo con la ley de Wien  $\lambda T_\gamma = 2,897 \times 10^{-2}mK$ , y por lo tanto la longitud de onda máxima de esta radiación es de  $\lambda \simeq mm$ . Por otro lado, la densidad de energía para el gas de fotones en equilibrio térmico viene dada por

$$d\rho_\gamma = g \times \omega \times \frac{d^3\omega}{(2\pi)^3} \times n_\omega, \quad (4.3)$$

donde  $g$  es el número de grados de libertad intrínsecos ( $g = 2$  para los fotones) y  $n_\omega$  es el número de ocupación de Bose-Einstein<sup>vi</sup>:

$$n_\omega = \frac{1}{e^{\omega/T_\gamma} - 1}. \quad (4.4)$$

Ya que en unidades naturales  $E_k = k = \omega$ , la densidad de energía de la radiación

---

<sup>vi</sup>Este número, en mecánica estadística, describe una de las dos maneras posibles en las cuales una colección de partículas, indistinguibles y que no interactúan, puede ocupar un conjunto disponible de estados discretos de energía en equilibrio termodinámico

emitida por intervalo logarítmico de frecuencia viene dado por

$$\frac{d\rho_\gamma}{d \ln k} = \frac{1}{\pi^2} \frac{k^4}{e^{\omega/T_\gamma} - 1}. \quad (4.5)$$

Esta última ecuación nos permite calcular la densidad total de energía  $\rho_\gamma$  a partir de la integración de

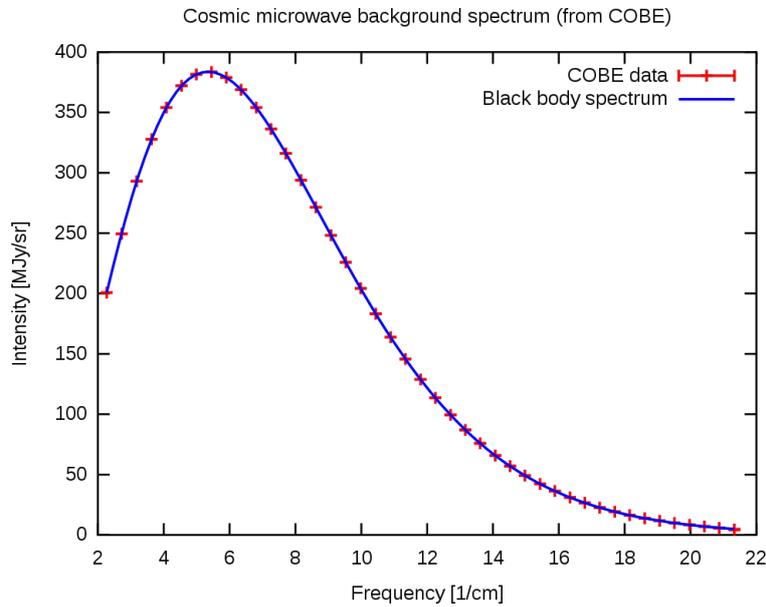
$$\rho_\gamma(t_0) = \frac{T_\gamma^4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{15} T_\gamma^4, \quad (4.6)$$

donde se ha definido  $x = k/T_\gamma$  y la integral de la segunda igualdad corresponde a  $\pi^4/15$ . Por otro lado, la ecuación 4.6 referente al espectro se puede graficar en términos de la frecuencia tomando que en unidades naturales  $\nu = 2\pi k$  y que

$$x = \frac{k}{T_\gamma} = 0,01765 \left( \frac{\nu}{GHz} \right), \quad (4.7)$$

tal como podemos ver en la figura 4.11, en la cual se compara la radiación teórica de cuerpo negro con la obtenida experimentalmente de la radiación CMB (para ver una desviación entre los datos experimentales y la curva teórica se tendría que ampliar la figura 10000 veces).

Por otro lado, el espectro uniforme de emisión de la CMB como cuerpo negro, el cual absorbe toda la radiación electromagnética que cae en el y que no refleja ninguna, entra en conflicto con la distribución de materia en el Universo actual, que como veíamos anteriormente está organizada en estructuras no-lineales de filamentos y vacíos. No obstante, si se analiza el espectro de radiación a escalas más pequeñas (a desviaciones de  $\Delta T$  del orden de  $\sim \mu K$ ), se observan leves anisotropías en la CMB, las cuales constituyen la huella de los vestigios de unas ondas sonoras [269], conocidas como oscilaciones bariónicas acústicas, las cuales analizaremos a continuación.



**Figura 4.11:** Gráfica del espectro CMB medido por el satélite COBE, correspondiente a la medida más precisa de radiación de cuerpo negro que existe en la naturaleza.

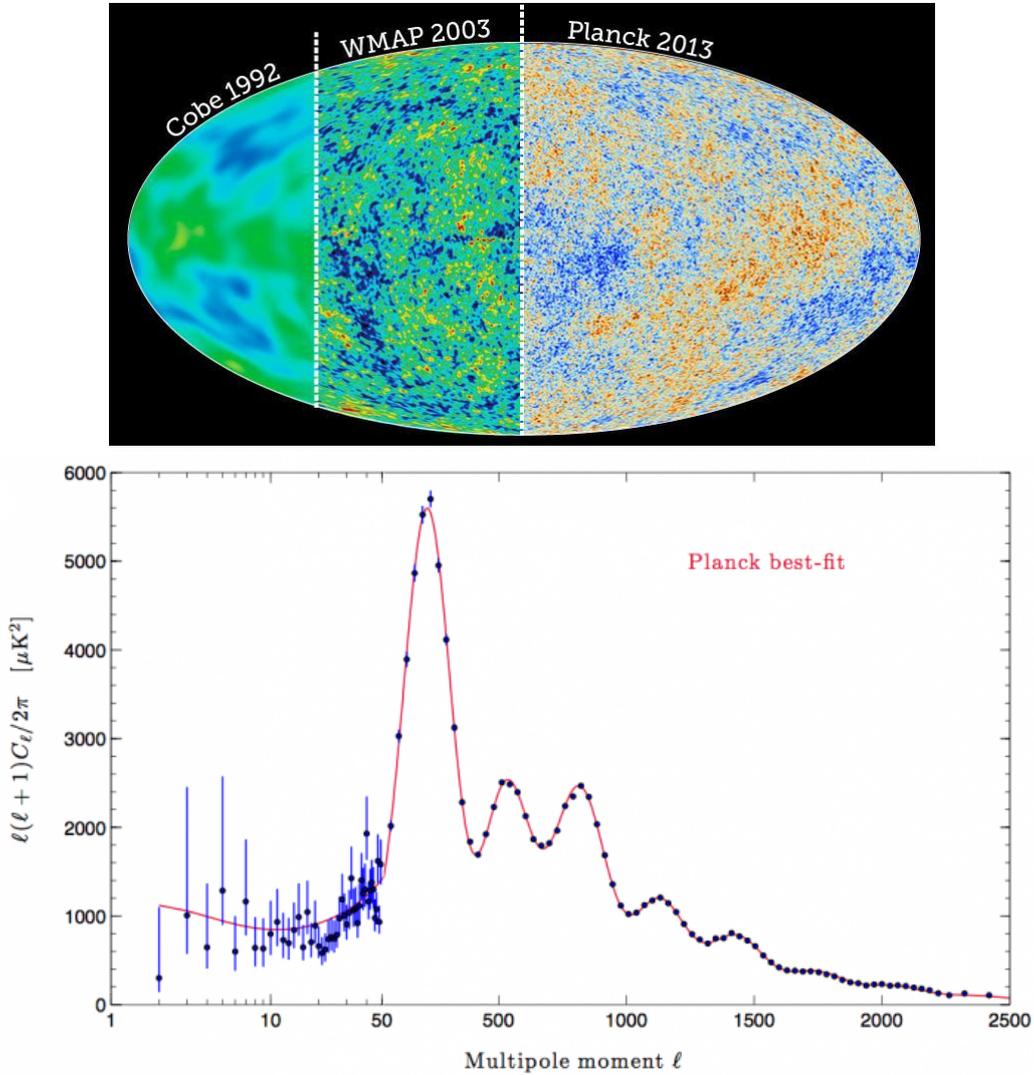
#### 4.2.2. Anisotropías en la Radiación de Fondo Microondas

Las anisotropías de la CMB, la cuales corresponden a una dependencia direccional en su espectro de emisión, se dividen normalmente en dos categorías: las anisotropía primarias (en las cuales nos centraremos), correspondientes a los efectos que ocurren en la superficie última de dispersión (*last surface scattering*<sup>VII</sup>); y las anisotropías secundarias, debidas a los efectos de interacción entre la radiación de fondo con gas y potenciales gravitatorios, las cuales ocurren entre la última superficie de dispersión y el observador.

Las anisotropías primarias, detectadas originalmente por el satélite COBE y refinadas posteriormente por el WMAP y el satélite Planck (ver figura 4.12 (a)), se determinan a partir de la intensidad de la CMB como función de la frecuencia y de una dirección  $\hat{n}$  en el cielo. Aunque en este punto pueda parecer demasiado detallado, para entender bien la figura típica 4.12 (b), tanto en el eje vertical ( $l(l+1)C_l/2\pi$ ) medido en [ $\mu K^2$ ]), como en el horizontal (momento multipolar  $l$ ), a continuación desarrollamos una serie de expansiones

<sup>VII</sup>Referentes al conjunto de puntos en el espacio correspondientes a la emisión de fotones desacoplados durante la época de la recombinación.

para parametrizar desde cero las fluctuaciones de temperatura  $\delta T/T$  de la CMB.



**Figura 4.12:** Imágenes de la CMB en varios detectores y espectro de emisión correspondiente a las anisotropías de la CMB.

Para ello consideramos una fluctuación espacial en la temperatura de la CMB y la expandimos como una serie integral de Fourier (similar a como hacíamos en el capítulo 1 para el caso de los ruidos) tal que

$$\Delta_I(\vec{x}, \hat{n}, \tau) = \frac{\delta T}{T}(\vec{x}, \hat{n}, \tau) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int d^3k e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}} \Delta_I(\vec{x}, \hat{n}, \tau) \quad (4.8)$$

donde  $\vec{k}$  es la dirección del número de onda de Fourier y  $\hat{n}$  es la dirección del momento

del fotón. Asumiendo que el observador (p.e. el satélite Planck desde la órbita de la Tierra) se localiza en el tiempo  $\tau$  (eventualmente coincidiendo con el tiempo presente  $\tau_0$ ) y que  $\vec{x} = 0$ , entonces la ecuación 4.8 se puede expandir en armónicos esféricos de la siguiente manera

$$\Delta_I(\hat{n}) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\hat{n}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int d^3k \Delta_I(\vec{x}, \hat{n}, \tau) \quad (4.9)$$

La amplitud de Fourier que aparece en 4.8 se puede expandir en polinomios de Legendre de acuerdo a la relación

$$\Delta_I(\vec{x}, \hat{n}, \tau) = \sum_{l=0}^{\infty} (-i)^l (2l+1) \Delta_{II}(\vec{k}, \tau) P_l(\vec{k} \cdot \hat{n}). \quad (4.10)$$

Ahora, los polinomios de Legendre que aparecen en 4.10 se pueden expresar a partir del teorema de adición de armónicos esféricos como

$$P_l(\vec{k} \cdot \hat{n}) = \frac{4\pi}{2l+1} \sum_{m=-l}^l Y_{lm}^*(\vec{k}) Y_{lm}(\hat{n}). \quad (4.11)$$

Insertando la ecuación 4.10 y a partir de la igualdad de la ecuación 4.9, los coeficientes  $a_{lm}$  se pueden determinar a partir de

$$a_{lm} = \frac{4\pi}{(2\pi)^{3/2}} (-i)^l \int d^3k Y_{lm}^*(\vec{k}) \Delta_{II}(\vec{k}, \tau). \quad (4.12)$$

Así de esta manera la función de correlación entre dos puntos de temperatura en el cielo entre dos direcciones, definidas como  $\hat{n}_1$  y  $\hat{n}_2$ , se puede escribir como

$$C(\Theta) = \langle \Delta_I(\hat{n}_1, \tau_0) \Delta_I(\hat{n}_2, \tau_0) \rangle, \quad (4.13)$$

donde  $C(\Theta)$  no depende del ángulo azimutal debido a la isotropía del fondo del espacio-tiempo y donde los brackets definen un promedio en el conjunto. Por lo tanto debido a

que el promedio del conjunto solo depende de  $l$  y no de  $m$  tenemos que

$$\langle a_{lm} a_{l'm'}^* \rangle = C_l \delta_{ll'} \delta_{mm'}, \quad (4.14)$$

donde  $C_l$  es la potencia espectral angular (la misma PSD del capítulo 1, pero en el caso de armónicos esféricos). Finalmente a partir de la relación anterior tenemos que

$$C(\Theta) = \langle \Delta_I(\hat{n}_1, \tau_0) \Delta_I(\hat{n}_2, \tau_0) \rangle \equiv \frac{1}{4\pi} \sum_l (2l+1) C_l P_l(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_2). \quad (4.15)$$

Así de esta manera vemos en la figura 4.12 como se gráfica la cantidad  $C_l l(l+1)/(2\pi)$  directamente, tal como prosigue de la igualdad

$$\sum_l \frac{2l+1}{4\pi} C_l \simeq \int \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l d \ln l, \quad (4.16)$$

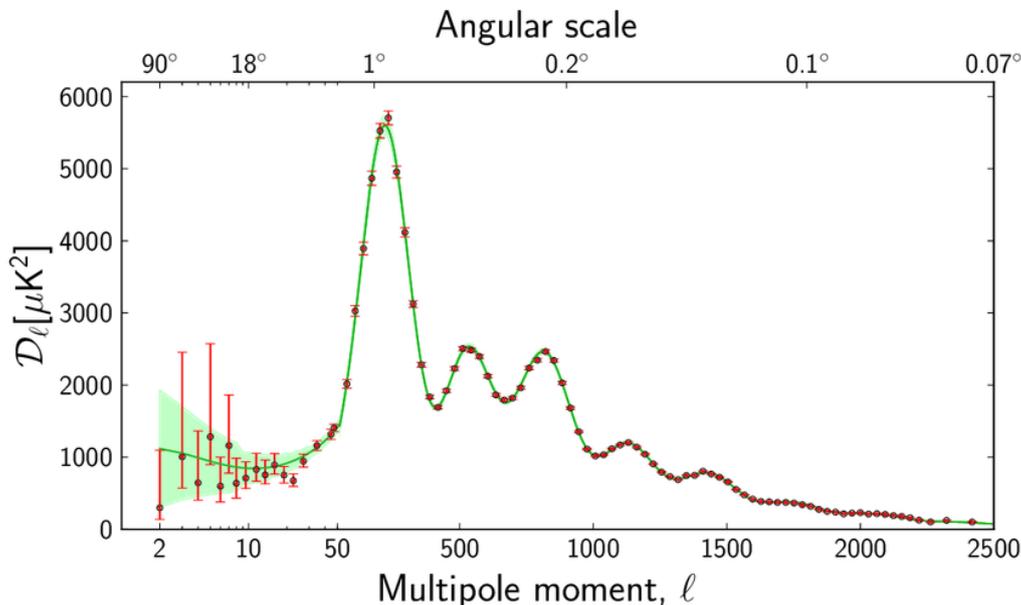
donde  $C_l l(l+1)/(2\pi)$  es aproximadamente la potencia por intervalo logarítmico  $l$ . En el caso de la figura 4.12, la potencia espectral angular se mide en  $[\mu K^2]$ . De la misma manera se puede graficar en el eje horizontal la escala angular  $\theta$  en vez del momento multipolar  $l$  a partir de la relación  $\theta = 2\pi/l$ , tal como vemos en la figura 4.13. En esta gráfica se puede observar un pico principal alrededor de la escala angular de  $1^\circ$ , el cual corresponde al pico de las oscilaciones acústicas, tal como veremos a continuación.

### 4.2.3. Picos Acústicos

Como mencionamos anteriormente, cuando la temperatura del Universo era del orden de  $\sim 3000K$  y a un corrimiento al rojo (*redshift*)<sup>viii</sup> de  $z \approx 10^3$  (siendo  $z = 0$  el

---

<sup>viii</sup>El corrimiento al rojo  $z$  se define como el corrimiento de las características espectrales hacia longitudes de onda mayores debido a la combinación del efecto Doppler y de la expansión general del Universo. Fuera de las galaxias del Universo cercano el único efecto relevante es debido a la expansión cosmológica, entendida como un estiramiento de la métrica del espacio-tiempo [269]. En la descripción matemática estándar en cosmología a partir del modelo de Friedmann-Lemaître, las distancias se definen a partir de la métrica de Robertson-Walker, las cuales describen el caso más general de un espacio uniforme y homogéneo que se expande según  $d\Sigma^2 = \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2$ , donde  $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2$  y donde  $k$  es una constante de la curvatura y  $r$  un factor de escala. En un Universo en expansión el corrimiento al rojo cosmológico de un objeto está directamente relacionado con la distancia. Así la distancia propia a



**Figura 4.13:** Observación del primer pico acústico en las anisotropías de la CMB alrededor de la escala angular de  $1^\circ$ .

tiempo presente) correspondiente a hace aproximadamente 380000 años, los electrones y los protones se combinaron para formar hidrógeno neutro, evento que se conoce como recombinación. Antes de esta época, los electrones libres actuaban como una especie de pegamento entre los fotones y los bariones (protones y neutrones) a través de la dispersión de Thompson y de Coulomb, y debido a esto en esa época la materia existía en una especie de plasma relativista formado por un fluido de fotones y bariones acoplados entre sí. Así de esta manera los picos que se observan en la figura 4.13, conocidos como picos acústicos, se pueden explicar casi completamente a través del análisis de este fluido previo a la recombinación, capaz de sostener ondas sonoras, de la misma manera que a partir del análisis armónico de un espectrograma de un sonido se puede inferir la geometría del instrumento que lo produjo [270].

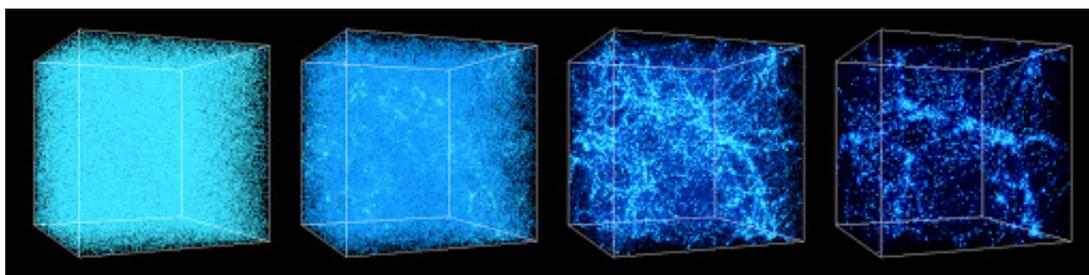
Estas desviaciones, a partir de un Universo perfectamente homogéneo, se supone que sucedieron durante los primeros momentos de éste, probablemente por fluctuaciones cuán-

---

un objeto es la integral del factor de escala  $r$  sobre la métrica tal que  $D = r(t) \int_0^{r_1} \frac{dr_1}{\sqrt{1-kr^2}} = \frac{r(t)}{\dot{r}(t)} cz$ , la cual se reduce a  $D = cz/H_0$  donde  $H_0 = \frac{\dot{r}(t)}{r(t)}$  es la constante de Hubble.

licas durante la época inflacionaria<sup>ix</sup>, la cual se piensa que expandió exponencialmente el cosmos en su primera fracción de segundo. Después de este tiempo estas desviaciones o inhomogeneidades crecieron y se volvieron más pronunciadas a lo largo del resto de la historia cósmica como resultado de los desbalances que ellas mismas produjeron [270].

La transición de desacople entre el plasma ionizado de bariones y fotones y el gas neutro tuvo un gran impacto en la evolución de estas fluctuaciones. Por un lado, en el cosmos neutro la presión de radiación de los fotones es despreciable y las fluctuaciones se vuelven inestables principalmente debido a la gravedad, tal como se puede observar en las simulaciones numéricas que se muestran en la figura 4.14. En esta figura se observa como las regiones más densas atraen más materia más rápidamente que lo que la expansión de Hubble puede transportar, y así éstas se vuelven cada vez más y más densas con el tiempo. De la misma manera la materia que se remueve de las regiones menos densas hace que éstas se vuelvan cada vez menos densas con el tiempo. Finalmente este contraste entre regiones densas y vacías se amplifica dando lugar con el tiempo a las estructuras de gran escala compuestas de filamentos, nudos y vacíos.



**Figura 4.14:** Simulación por computador del agrupamiento de la materia (oscura y bariónica) debido a las fuerzas de gravedad en un Universo post recombinación (de  $z = 30$  a la izquierda a  $z = 0$  a la derecha).

(<http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>)

No obstante en la época de plasma antes del desacoplamiento, la presión de radiación fotónica imponía una fuerza sobre la materia bariónica. Para perturbaciones en la densidad

---

<sup>ix</sup>La inflación en cosmología es una teoría sobre la expansión exponencial del espacio en el Universo temprano. Se supone que la época inflacionaria abarcó desde los  $10^{-42}s$  después de la singularidad del Big-Bang hasta  $10^{-33}s - 10^{-32}s$  después de la singularidad. Seguido al período inflacionario el Universo ha continuado expandiéndose pero esta expansión no se ha ido acelerando tal como lo hizo en ese período.

especialmente mayores que el camino libre medio<sup>x</sup>, la compresión en el fluido de plasma viene acompañada de un incremento de la densidad, la temperatura y de la presión de los fotones. De esta manera la compresión actúa dispersando los fotones a energías mayores e incrementando la presión de radiación, lo que genera a la vez una fuerza opuesta a la compresión que da como resultado final una onda de expansión sonora en el plasma acoplado de bariones y fotones (ver figura 4.15)[270]<sup>xi</sup>.

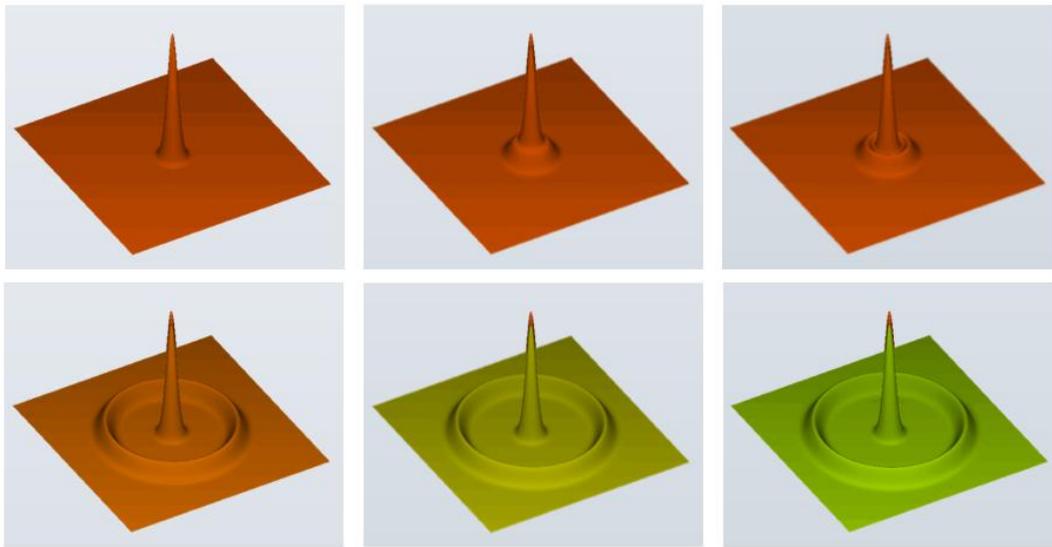
Esta onda sonora se puede entender similarmente a una onda en un fluido común, exceptuando que en el fluido de plasma la fuerza de restauración viene dada por la presión de fotones atrapados en éste [270]. Otra propiedad destacable en este fluido de plasma es que la velocidad del sonido de las oscilaciones bariónicas acústicas era de aproximadamente  $1/\sqrt{3}$  de la velocidad de la luz  $c$ , debido al hecho que la presión de radiación y la densidad de energía del campo fotónico era mucho mayor a la de los bariones. La temperatura previa a la recombinación se estima del orden de  $3000K$ , lo que a partir de la ecuación 4.6 del cuerpo negro nos da una estimación de  $n_\gamma = 10^{12}$  fotones por metro cúbico, número mucho mayor a los 100 nucleones (protones o neutrones) de materia bariónica por metro cúbico estimados. Finalmente la velocidad del sonido en el plasma viene determinada por el hecho que ésta escala como la raíz cuadrada de la fuerza de restauración por unidad de inercia y a la vez la presión de radiación de un campo electromagnético es precisamente  $1/3$  de su densidad de energía [270].

Llegados a este punto nos podemos preguntar como es que estas ondas sonoras, relativistas, producidas en este fluido bariónico y de fotones seleccionan esa escala angular preferida de aproximadamente  $1^\circ$ . Tal como veíamos, las anisotropías en la CMB son el resultado de un patrón de fluctuaciones de densidad en una superficie esférica (más precisamente en una cáscara delgada del Universo) centrada en nosotros, a partir de la cual observamos a esa cáscara desde una distancia muy grande. Así la escala angular preferida

---

<sup>x</sup>En mecánica estadística se define como camino libre medio a la distancia o espacio entre dos colisiones sucesivas de las moléculas de un gas. Se puede estimar a partir de la relación  $l = \frac{1}{n\sigma}$  donde  $n$  es el número de moléculas por unidad de volumen y  $\sigma$  es la sección eficaz de dispersión.

<sup>xi</sup>Creando una imagen mental del Universo como una especie de placenta sónica.



**Figura 4.15:** Simulación por computador de una onda sonora esférica a partir de una región densa al inicio de la época de plasma (pico naranja primera imagen) que se propaga hasta que la materia bariónica se desacopla de la radiación 380000 años después (fotograma en verde) [270].

es el resultado de una escala de longitud en esa superficie de dispersión última, la cual mencionamos anteriormente, también llamada escala acústica.

Esta escala acústica es a la vez la distancia que una onda de sonido, propagándose desde una fuente puntual en el período final de la inflación, hubiera viajado antes de la transición de desacoplamiento de los fotones al final de la época del plasma y al inicio de la recombinación [269]. A partir de ese último momento, y debido a que la expansión de Hubble ha ido estirando el Universo más de 1000 veces (como veíamos en <sup>viii</sup>), el radio de esa onda de sonido esférica que se ha ido propagando desde el momento de inicio de la época del plasma hasta su fin es de 480 millones de años luz (Mly) (en la próxima sección analizaremos este cálculo en más detalle).

En cosmología (y como veíamos en <sup>viii</sup> a partir de la definición de distancia propia) se suele utilizar un sistema de coordenadas, llamado comóvil (*commoving*), el cual se dilata con la expansión de Hubble. La distancia comóvil, definida a partir de estas coordenadas, es la distancia entre dos puntos medida a lo largo del camino definido por el tiempo

cosmológico presente y es constante en el tiempo para objetos que se mueven a la velocidad de expansión de Hubble. Esta distancia se deriva de la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (ver <sup>viii</sup>) y viene dada por

$$\chi = \int_{t_e}^t c \frac{dt'}{r(t')}, \quad (4.17)$$

donde  $r(t')$  es el factor de escale,  $t_e$  es el tiempo de emisión de los fotones detectados por el observador,  $t$  el tiempo presente y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. De esta manera dos puntos en reposo tienen una distancia comóvil de separación constante y con un valor dado por convención por su separación actual. Debido a esto, después del desacoplamiento de los fotones del fluido de plasma en el momento de la recombinación, la escala acústica tiene una separación comóvil constante de  $480Mly$ .

Resumidamente, el primer pico acústico a  $1^\circ$  que podemos ver en la figura 4.13 manifiesta la distancia que una onda de sonido primordial se hubiera propagado antes del fin abrupto de la época de plasma. Debido a la expansión de Hubble en el cosmos esta distancia característica se ha estirado a  $480Mly$  y precisamente esta distancia corresponde a la distancia de separación preferencial que se observa en cualquier corrimiento al rojo en las estructuras a gran escala del Universo actual, tal y como veíamos en las figuras 4.9 y 4.10.

Esta observación al fin remarca el hecho que la conformación de las estructuras cosmológicas a gran escala en el Universo, comprendidas como veíamos por filamentos, nudos y vacíos, tienen su origen en fenómenos de carácter sonoro ocurridos 13,7 billones ( $10^9$ ) de años atrás, cuando el Universo solo tenía 380000 años, era 1000 veces más pequeño y 1 billón de veces más denso que lo que es ahora.

#### **4.2.4. Oscilación Acústica Idealizada**

En esta sección analizaremos desde una perspectiva sonora las propiedades de las oscilaciones bariónicas acústicas para intentar fundamentar teóricamente los resultados

obtenidos anteriormente acerca del valor específico de la escala acústica. Para ello partimos del caso idealizado en el que todo el contenido del Universo previo a la recombinación se puede describir a partir de un fluido perfecto idealizado, i.e. un fluido barotrópico (con una relación conocida entre su presión y su densidad de energía) y que no es viscoso. Así un ejemplo de fluido perfecto es el gas de fotones en equilibrio térmico que vimos al inicio al estudiar la radiación de cuerpo negro (descrito en la ecuación 4.6).

En nuestro caso el plasma compuesto de fotones y bariones acoplados se puede idealizar como un gas de fotones si despreciamos los efectos dinámicos de la gravedad y los bariones<sup>xii</sup>. Partimos entonces del caso idealizado del gas de fotones, el cual se puede describir por el tensor de energía-momento  $T_{\mu}^{\nu}$ , que describe la densidad y el flujo de energía y momento en el espacio-tiempo (de manera análoga al capítulo anterior donde generalizábamos la ley de Newton mediante  $\sigma_{ij}$ , correspondiente al tensor de tensiones) a partir de

$$T_{\mu}^{\nu} = (p_{\gamma} + \rho_{\gamma})u_{\mu}u^{\nu} - p_{\gamma}\delta_{\mu}^{\nu}, \tag{4.18}$$

donde  $\rho_{\gamma}$  es la densidad de masa-energía de los fotones ( $[kg/m^3]$ ),  $p_{\gamma}$  es la presión hidrostática de los fotones ( $[Pa]$ ), que en nuestro caso equivale a la ecuación de estado dada por

$$p_{\gamma} = \frac{\rho_{\gamma}}{3}, \tag{4.19}$$

y  $u_{\mu} = dx^{\mu}/ds$  es la cuadrivelocidad del fluido de fotones ( $[m/s]$ ) y  $\delta_{\mu}^{\nu}$  es el tensor métrico que se satisface  $\delta_{\mu\nu}u^{\mu}u^{\nu} = c^2 = 1$  tomando  $c = 1$ .

Las ecuaciones 4.18 y 4.19 constituyen el primer ejemplo de un fluido radiante. Por otro lado la conservación del tensor de energía-momento se puede escribir en su forma

---

<sup>xii</sup>A continuación partimos del curso introductorio de doctorado del CERN, titulado “Why CMB Physics”, de Massimo Giovani [271].

general como

$$\nabla_{\mu} T_{\mu}^{\nu} = 0 \tag{4.20}$$

donde ahora  $\nabla_{\mu}$  denota la derivada covariante, ya no con respecto la métrica dada por el tensor métrico  $\delta_{\mu}^{\nu}$  canónico, sino por la métrica cosmológica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) dada por  $g_{\mu\nu}$  (ver <sup>viii</sup>):

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu} = dt^2 - r^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right], \quad \text{donde } d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2 \tag{4.21}$$

donde  $k$  es una constante de la curvatura y  $r$  un factor de escala, lo que para la expresión 4.20, utilizando la definición de derivada covariante, nos da la siguiente expresión más explícita

$$\partial_{\mu} T_{\mu}^{\nu} + \Gamma_{\alpha\mu}^{\mu} T_{\nu}^{\alpha} - \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} T_{\beta}^{\alpha} = 0, \tag{4.22}$$

donde

$$\Gamma_{\alpha\mu}^{\mu} = \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} (-\partial_{\beta} g_{\mu\nu} + \partial_{\nu} g_{\beta\mu} + \partial_{\mu} g_{\nu\beta}), \tag{4.23}$$

son las conexiones de Christoffel computadas para el tensor métrico. Así en la métrica FLRW la ecuación 4.22 implica finalmente que

$$\dot{\rho}_{\gamma} + 3H(\rho_{\gamma} + p_{\gamma}) = 0, \tag{4.24}$$

con la derivada punto denotando la derivación respecto a la coordenada de tiempo cósmico  $t$  y

$$H = \frac{\dot{r}}{r}, \tag{4.25}$$

el parámetro de expansión de Hubble <sup>viii</sup>.

No obstante para entender la ecuación de evolución 4.24 dentro del marco de las oscilaciones acústicas tenemos que restringirnos al espacio de Fourier, que tal como veíamos en 4.8 nos permite descomponer la temperatura (por ejemplo el monopolo  $l = m = 0$ ) como

$$\Delta_I(\vec{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int d^3k e^{-i\vec{k}\cdot\vec{x}} \Delta_I(\vec{k}). \quad (4.26)$$

En este caso asumiendo perturbaciones muy pequeñas, la evolución de las ecuaciones se vuelve lineal y los diferentes modos de Fourier evolucionan independientemente. Por esta razón en vez de las derivadas parciales para el campo de temperatura  $\Delta_I(\vec{x})$  tenemos ecuaciones diferenciales ordinarias para  $\Delta_I(\vec{k})$ . Además debido a la simetría rotacional todos los  $\Delta_I(\vec{k})$  para un  $k$  dado obedecen las mismas ecuaciones. Explícitamente las perturbaciones de temperatura en el espacio de Fourier se pueden escribir como [269]:

$$\dot{\Delta}_I = -\frac{1}{3}k u_\gamma, \quad (4.27)$$

donde esta ecuación para la temperatura de los fotones  $\Delta_I$  se parece a la ecuación de continuidad en el espacio de Fourier (donde las derivadas  $\nabla$  se transforman en números de onda  $i\vec{k}$ ). Igual que en la ecuación 4.24, aquí la derivada punto está definida respecto al tiempo conformal cosmológico definido por  $\eta \equiv \int dt/r(t)$ .

Por otro lado la velocidad del fluido de fotones se escribe como un escalar  $u_\gamma$  en vez de un vector debido a que en el Universo temprano sólo la componente de la velocidad paralela a  $\vec{k}$  es relevante. El factor  $1/3$  proviene de que en la ecuación de continuidad se conserva el número de fotones pero no la temperatura y por lo tanto  $n_\gamma \sim T^3$ .

Así de esta manera podemos plantear la ecuación de Euler, la cual es una expresión de la conservación del momento (ver ecuación 4.20). A partir de las relaciones expuestas anteriormente 4.18 y 4.19 y teniendo en cuenta que  $\rho_\gamma \sim T^4$  tenemos que en el espacio de

Fourier ( $4k\Delta_I\rho_\gamma/3$ ), la ecuación de Euler viene dada por [269]:

$$\dot{u}_\gamma = k\Delta_I. \quad (4.28)$$

Así diferenciando la ecuación de continuidad 4.27 e insertando la ecuación de Euler 4.28 tenemos finalmente la forma más básica de ecuación para un oscilador

$$\ddot{\Delta}_I + c_s^2 k^2 \Delta_I = 0, \quad (4.29)$$

donde  $c_s \equiv \sqrt{\dot{p}/\dot{\rho}} = 1/\sqrt{3}$  es la velocidad del sonido en el fluido de plasma (sin tener en cuenta los bariones para este caso idealizado).

Lo que de alguna manera nos indica la ecuación 4.29 es que los gradientes de presión actúan como una fuerza restaurativa en las perturbaciones iniciales del sistema, las cuales después oscilan a la velocidad del sonido. Físicamente estas oscilaciones de temperatura representan el calentamiento y el enfriamiento del fluido, el cual se comprime y se rarifica a partir de una onda sonora que es estacionaria hasta el momento de la recombinación. Así asumiendo unas perturbaciones con una velocidad inicial despreciable, obtenemos una solución de la ecuación 4.29 para una distribución de temperaturas en el momento de la recombinación dada por

$$\Delta_I(\eta) = \Delta_I(0)\cos(ks), \quad (4.30)$$

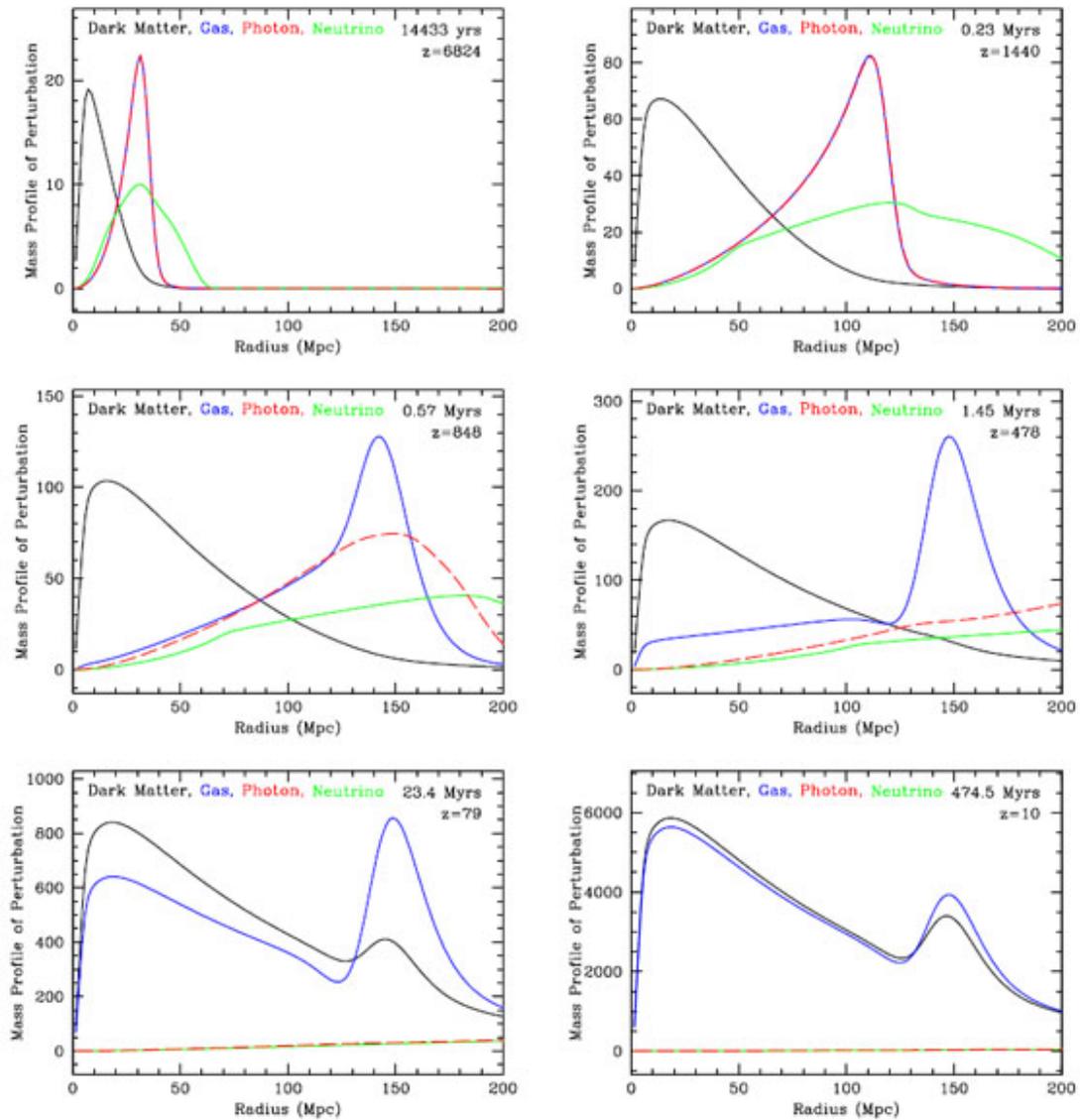
donde  $s = \int c_s d\eta \approx \eta/\sqrt{3}$  es la distancia que puede viajar el sonido en un tiempo  $\eta$ , normalmente denominado como horizonte de sonido.

En el caso límite en el que las escalas al observador sean grandes comparadas con el horizonte de sonido  $ks \ll 1$ , la perturbación se congela en sus condiciones iniciales y es por esto motivo que las anisotropías observadas actualmente (ver figura 4.16) miden directamente las condiciones iniciales, tal que  $\Delta_I(\eta) \approx \Delta_I(0)$  [269].

Así de esta manera, tal como podemos ver en la figura 4.16, cada uno de las gráficas

muestra el cálculo de la onda acústica típica, descrita idealmente por la ecuación 4.30 (para la ecuación completa que tiene en cuenta la gravedad, la carga bariónica, el balance de radiación-materia y el amortiguamiento debido a la viscosidad se puede consultar [269]).

Esta onda acústica se propaga a partir de una perturbación puntual primordial y modula el efecto sobre los distintos tipos de materia y radiación. Así cada gráfica en 4.16 está etiquetada por su tiempo posterior al final del período de inflación y por su correspondiente corrimiento al rojo. De la misma manera se muestran los perfiles de sobredensidad *versus* la distancia radial a la perturbación inicial para: la materia oscura fría no bariónica (negro), para el gas bariónico ordinario hecho de núcleos y electrones (azul), para el campo de fotones (rojo) y para el fondo de neutrinos (verde).



**Figura 4.16:** Propagación de las ondas bariónicas acústicas vistas en función del perfil de perturbaciones de masa para la materia y radiación. La gráfica (columna 1, fila 1) muestra la perturbación inicial a  $z = 6824$ ; (2,2) corresponde al momento de la recombinación con los fotones completamente desacoplados a  $z = 478$ ; (2,3) a  $z = 10$  muestra el momento en el que las galaxias se empiezan a formar y donde permanece una sobredensidad centrada en el origen y en un radio de  $480 Mly$  debido a la huella de la onda de sonido.

### 4.3. Especulaciones Híbridas: Quimeras Cosmológicas

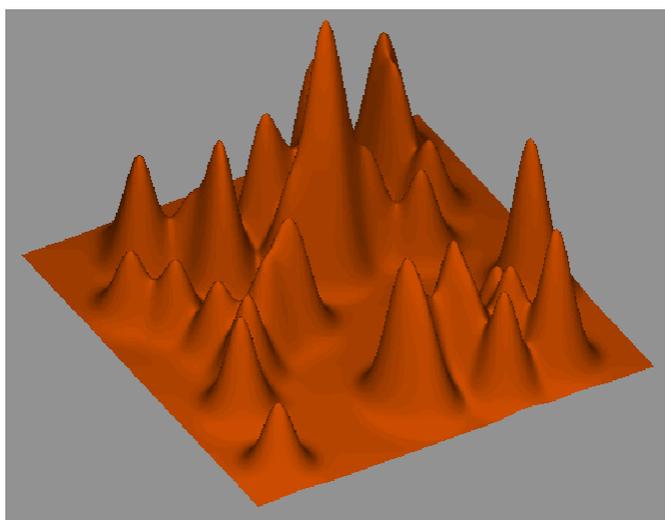
En esta última sección de la tesis, a modo de recapitulación y rizando un poco el rizo, recuperamos las investigaciones abordadas en las secciones 4.1 y 4.2 para hibridarlas entre sí. Así brevemente, la investigación que presentamos en este punto se basa en la combinación de los dos fenómenos expuestos anteriormente, i.e los estados quimera en conjunto de osciladores acoplados y las oscilaciones bariónicas acústicas, para plantear una conjetura referida al período inflacionario en cosmología.

Informalmente la argumentación se desenvuelve de la siguiente manera. Partiendo del caso mínimo en el que un conjunto compuesto de tres péndulos mecánicos acoplados entre sí muestra estados quimera, i.e. donde una parte del conjunto de estos osciladores exhibe dinámicas ordenadas de sincronización mientras que la otra parte exhibe dinámicas desordenadas con oscilaciones desincronizadas, nos planteamos la posibilidad de la existencia de dichos estados en un sistema análogo cuántico.

Esta transición entre un sistema que opera en el límite clásico hacia un sistema en el cual los efectos cuánticos son predominantes, se puede correlacionar con la transición entre un período inflacionario del Universo y el período post-inflacionario gobernado por las oscilaciones bariónicas acústicas. Tal como veíamos anteriormente, este último período parte de una perturbación primordial en la cual una región pequeña del espacio es ligeramente más densa que el resto del Universo (ver la primera figura en 4.16), a partir de la cual las BAO determinan la evolución de la materia y la radiación hasta la época de la recombinación.

Por otro lado, esta perturbación primordial, que conforma una desviación en un cosmos perfectamente homogéneo, se suele explicar a partir de fluctuaciones cuánticas durante el período inflacionario, el cual se asume que expandió el cosmos en las primeras fracciones de segundo de existencia ( $\sim 10^{34} - 10^{-33} s$  después del Big-Bang). Debido a que cualquier tipo de materia clásica en los inicios de la inflación se corre enormemente hacia el rojo, y que como consecuencia la inflación previene la existencia de un mecanismo de causalidad para

generar las fluctuaciones en dicha materia, se asume que estas fluctuaciones emergen como fluctuaciones cuánticas del vacío. Finalmente estas fluctuaciones, de carácter aleatorio, son las que imprimen leves perturbaciones anisotrópicas en el tapete cósmico post-inflacionario tal como podemos ver en la figura 4.17, donde se muestra la mezcolanza de superposiciones de las ondas esféricas que veíamos en la figura 4.15.



**Figura 4.17:** Superposición de perturbaciones primordiales en el tapete cósmico provenientes de fluctuaciones cuánticas en la época inflacionaria. Éstas están distribuidas aleatoriamente en el espacio y poseen una amplitud igualmente aleatoria de materia y radiación.

En el caso en que estas perturbaciones primordiales emerjan del vacío nos encontramos ante una disconformidad aparente debida a que este estado vacío, correspondiente a un campo cuántico, se encuentra (localmente) en un estado de mínima energía potencial. Como consecuencia de este hecho este vacío no sería capaz de generar un estado excitado (correspondiente a una partícula) a partir de sí mismo. No obstante las teorías inflacionarias, para solventar este conflicto, postulan la existencia de más de un estado vacío, a partir de los cuales diferentes vacíos, a pesar de no poseer partículas, podrían contener diferentes energías de vacío.

Básicamente las teorías inflacionarias permiten describir, mediante este mecanismo el cual es capaz de generar una transición de fase entre distintos estados vacíos, un espectro

cosmológico de perturbaciones invariantes de escala, i.e. homogéneo; lo cual a la vez supone un requerimiento fundamental para poder explicar posteriormente los datos y la teoría proveniente de la formación de estructuras.

Visto desde otra perspectiva, la inflación es la responsable de generar un estado excitado asimétrico a partir de un conjunto de estados fundamentales, los cuales se suponen simétricos a partir de la singularidad inicial del Big-Bang. No obstante debido a este hecho, el escenario inflacionario no es aún capaz de proporcionar una descripción completa del Universo temprano, ya que en éste las fluctuaciones emergen a partir de lo que se conoce como “zona de ignorancia”, período transPlanckiano<sup>xiii</sup> en el cual ya no es posible utilizar las ecuaciones de Einstein [272].

Aunque existen varios modelos “juguete” (*toy models*) para estas escalas donde predomina la gravedad cuántica (por ejemplo modelos basados en teorías de cuerdas en un gas, o en escenarios cíclicos y ekpiróticos [273]) éstos permanecen aún si poder ser validados más allá de su coherencia fenomenológica. Así en nuestro caso presentamos, puerilmente, un modelo “juguete” formalmente diferente, basado la existencia de estados entrelazados en un sistema de osciladores cuánticos, para finalmente interpretar sus resultados como una ruptura de simetría dentro del marco inflacionario.

### 4.3.1. Osciladores Cuánticos Acoplados

En esta sección partimos de un modelo general de  $N$  osciladores cuánticos con interacciones cuadráticas [274], para enfocarlo a nuestro caso específico, compuesto de tres osciladores idénticos acoplados idénticamente entre sí, en analogía al sistema de estados quimera para tres osciladores mecánicos expuesto anteriormente.

Así de esta manera consideramos un sistema mecánico cuántico con  $N$  coordenadas

---

<sup>xiii</sup>En cosmología inflacionaria, e igualmente en la física de los agujeros negros, el problema transPlanckiano se refiere a la aparición de cantidades más allá de las escalas de Planck, determinadas por las unidades de Planck  $l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$ ,  $m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$ ,  $t_P = \frac{l_P}{c} = \frac{\hbar}{m_P c^2} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$ . En estas escalas se supone que la física general (entendida a partir de interacciones de campos e.m., gravedad, fuerza nuclear débil y fuerte) sufre modificaciones.

$x_i$  y con momentos conjugados  $p_j$  tal que se satisfacen la relaciones de conmutación  $[x_i, p_j] = i\hbar\delta_{ij}$  con  $i, j = 1, 2, \dots, N$ . El operador hamiltoniano general para este caso es una función cuadrática de estas variables dinámicas definido por

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} (\mathbf{p}^\top \mathbf{T} \mathbf{p} + \mathbf{x}^\top \mathbf{V} \mathbf{x}) \quad (4.31)$$

donde  $\mathbf{p}^\top = (p_1, p_1, \dots, p_N)$ ,  $\mathbf{x}^\top = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  (donde  $\top$  es el transpuesto) y  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{V}$  son matrices  $N \times N$  reales simétricas.

Realizando la transformación canónica en nuestras variables tenemos

$$\mathbf{x} = \mathbf{C} \mathbf{x}', \quad \mathbf{p} = (\mathbf{C}^\top)^{-1} \mathbf{p}' \quad (4.32)$$

de tal manera que el nuevo momento  $\mathbf{p}'^\top = (p'_1, p'_2, \dots, p'_N)$  y las coordenadas  $\mathbf{x}'^\top = (x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$  satisfacen igualmente  $[x'_i, p'_j] = i\hbar\delta_{ij}$ . Escogemos ahora la matriz  $N \times N$  tal que

$$\mathbf{C}^{-1} \mathbf{T} (\mathbf{C}^\top)^{-1} = \mathbf{I}, \quad \mathbf{C}^\top \mathbf{V} \mathbf{C} = \mathbf{\Lambda}, \quad (4.33)$$

tal que  $\mathbf{I}$  es la matriz  $N \times N$  identidad y  $\mathbf{\Lambda}$  es la matriz diagonal con elementos  $\lambda_i$  con  $i = 1, 2, \dots, N$ . Así de esta manera el operador hamiltoniano en 4.31 queda transformado como

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} (\mathbf{p}'^\top \mathbf{p}' + \mathbf{x}'^\top \mathbf{\Lambda} \mathbf{x}'). \quad (4.34)$$

De esta ecuación podemos observar que existen estados ligados en el caso que se tenga  $\lambda_i > 0$  con  $i = 1, 2, \dots, N$ . Debido a las relaciones de conmutación entre los nuevos momentos y coordenadas, los valores propios vienen dados por la ecuación

$$\mathcal{E}_{\{n\}} = \hbar \sum_{i=1}^n \sqrt{\lambda_i} \left( n + \frac{1}{2} \right), \quad \{n\} = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (4.35)$$

Así a partir de la ecuación 4.33 se observa que

$$\mathbf{C}^{-1}\mathbf{T}\mathbf{V}\mathbf{C} = \mathbf{\Lambda}, \tag{4.36}$$

de tal manera que el problema se reduce así en diagonalizar la matriz no simétrica  $\mathbf{A} = \mathbf{T}\mathbf{V}$ .

Otra manera alternativa para obtener  $\mathcal{H}'$  en su forma diagonal es a partir de la diagonalización de matrices simétricas, para las cuales podemos definir  $\mathbf{C} = \mathbf{T}^{1/2}\mathbf{U}$  en el caso que  $\mathbf{T}$  se defina como positiva. Así de esta manera la ecuación 4.36 queda como

$$\mathbf{U}^{-1}\mathbf{T}^{1/2}\mathbf{V}\mathbf{T}^{1/2}\mathbf{U} = \mathbf{\Lambda}. \tag{4.37}$$

Debido a que  $\mathbf{S} = \mathbf{T}^{1/2}\mathbf{V}\mathbf{T}^{1/2}$  es simétrica entonces  $\mathbf{U}$  cumple el criterio de ortogonalidad ( $\mathbf{U}^{-1} = \mathbf{U}^\top$ ) y como consecuencia se puede diagonalizar.

Por otro lado podemos observar que a partir de las transformaciones anteriores las variables de coordenadas  $x'_i$  y de momento  $p'_i$  han dejado de tener unidades de longitud y de momento respectivamente, ya que ahora  $\mathbf{C}$  tiene unidades de masa<sup>-1/2</sup> (asumiendo que  $\mathbf{T}$  tiene unidades de masa<sup>-1</sup>). No obstante aún así se obtienen los mismos valores propios que en 4.35, ya que como veíamos las variables transformadas también satisfacen las relaciones de conmutación.

Finalmente resaltamos el hecho que para nuestro caso particular, el cual analizaremos a continuación para  $N = 3$ , es particularmente útil el uso de la matriz simétrica  $\mathbf{S}$  para determinar los valores de los parámetros del modelo compatibles con los valores propios  $\lambda_i$  positivos y para obtener soluciones de estados ligados. Finalmente es importante recordar el teorema que anuncia que esta matriz se define como positiva si y sólo si los menores complementarios menores (i.e. los determinantes obtenidos de eliminar una fila y una columna) son positivos.

### 4.3.2. Caso N=3

Para nuestro caso particular, análogo al de los tres péndulos clásicos acoplados, partimos de un sistema de tres osciladores armónicos acoplados con diferentes masas ( $m_1, m_2, m_3$ ), con frecuencias naturales ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) y acoplamientos ( $D_1, D_2, D_3$ ), tal que su Hamiltoniano se puede escribir como

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \left( \frac{p_1^2}{m_1} + \frac{p_2^2}{m_2} + \frac{p_3^2}{m_3} + m_1\omega_1^2 x_1^2 + m_2\omega_2^2 x_2^2 + m_3\omega_3^2 x_3^2 + D_{12}x_1x_2 + D_{13}x_1x_3 + D_{23}x_2x_3 \right), \quad (4.38)$$

Para este caso la matriz  $\mathbf{T}$  se define como positiva y diagonal, y las matrices relevantes para efectuar la diagonalización para el caso de este hamiltoniano son las siguientes

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \frac{D_{12}}{2m_1} & \frac{D_{12}}{2m_1} \\ \frac{D_{21}}{2m_2} & \omega_2^2 & \frac{D_{23}}{2m_2} \\ \frac{D_{31}}{2m_3} & \frac{D_{32}}{2m_3} & \omega_3^2 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

y

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \frac{D_{12}}{2\sqrt{m_1m_2}} & \frac{D_{12}}{2\sqrt{m_1m_3}} \\ \frac{D_{21}}{2\sqrt{m_1m_2}} & \omega_2^2 & \frac{D_{23}}{2\sqrt{m_2m_3}} \\ \frac{D_{31}}{\sqrt{m_1m_3}} & \frac{D_{32}}{2\sqrt{m_2m_3}} & \omega_3^2 \end{bmatrix}. \quad (4.40)$$

A partir de las cuales podemos calcular su polinomio característico a partir de

$$\lambda_3 - a\lambda_2 + b\lambda - c = 0 \quad (4.41)$$

$$a = (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2) \quad (4.42)$$

$$b = \left( \omega_1\omega_2 + \omega_1\omega_3 + \omega_2\omega_3 - \frac{D_{12}^2}{4m_1m_2} - \frac{D_{13}^2}{4m_1m_3} - \frac{D_{23}^2}{4m_2m_3} \right) \quad (4.43)$$

$$c = \left( \omega_1^2\omega_2^2\omega_3^2 - \left( \frac{D_{12}^2\omega_3^2}{4m_1m_2} + \frac{D_{13}^2\omega_2^2}{4m_1m_3} + \frac{D_{23}^2\omega_1^2}{4m_2m_3} - \frac{D_{12}D_{13}D_{23}}{4m_1m_2m_3} \right) \right). \quad (4.44)$$

Como podemos observar a simple vista, las expresiones analíticas para los valores propios  $\lambda_i$  y de la matriz de transformación  $\mathbf{C}$  a partir de las ecuaciones anteriores se hacen muy complicadas. No obstante si tomamos nuestro caso particular para el cual tomamos  $m_i = m$ ,  $\omega_i = \omega$  y  $D_{ij} = D$  para  $i, j = 1, 2, 3$ , tenemos que

$$\mathbf{A} = \mathbf{S} = \frac{1}{2m} \begin{bmatrix} m\omega & D & D \\ D & m\omega & D \\ D & D & m\omega \end{bmatrix}, \quad (4.45)$$

y finalmente los valores propios

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \omega^2 - \frac{D}{2m}, \quad \lambda_3 = \omega^2 + \frac{D}{2m}. \quad (4.46)$$

De estos valores propios se puede concluir que existen estados ligados solamente en los casos que la constante de acoplamiento entre los osciladores cumpla  $-2m\omega^2 < D < 2m\omega^2$ . Por otro lado a partir de los tres complementarios menores de la matriz obtenemos las condiciones  $m\omega^2 > 0$  (caso trivial) y

$$4m^2\omega^4 - D^2 > 0, \quad m\omega^2 + D > 0. \quad (4.47)$$

Para el cálculo de los vectores propios de  $\mathbf{S}$ , obtenemos la matriz de transformación

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 1 & \sqrt{2} \\ 0 & -2 & \sqrt{2} \\ -\sqrt{3} & 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (4.48)$$

tal que  $\mathbf{x} = \mathbf{U}\mathbf{x}'$  y  $\mathbf{p} = \mathbf{U}\mathbf{p}'$ .

A partir de los resultados anteriores y de la ecuación 4.35 podemos calcular el espectro de niveles de energía para el estado fundamental  $n = 0$

$$\mathcal{E}_{\{0\}} = \hbar \left( \sqrt{\omega^2 - \frac{D}{2m}} + \frac{1}{2} \sqrt{\omega^2 + \frac{D}{2m}} \right) \quad (4.49)$$

y para el primer estado excitado  $n = 1$

$$\mathcal{E}_{\{1\}} = 3\hbar \left( \sqrt{\omega^2 - \frac{D}{2m}} + \frac{1}{2} \sqrt{\omega^2 + \frac{D}{2m}} \right). \quad (4.50)$$

Tal como podemos observar, si tomamos el caso  $D \rightarrow 0$  obtenemos el caso correspondiente a tres osciladores desacoplados entre sí

$$\mathcal{E}_{\{0\}} = 3 \times \left( \frac{1}{2} \hbar \omega \right), \quad \mathcal{E}_{\{1\}} = 3 \times \left( \frac{3}{2} \hbar \omega \right), \quad (4.51)$$

las cuales nos dan exactamente tres veces los niveles de energía del oscilador armónico simple para el estado fundamental y excitado.

Finalmente el problema de vectores propios para la matriz  $\mathbf{S}$  correspondiente a los valores propios anteriores es

$$\mathbf{S}\mathbf{x}' = \lambda\mathbf{x}', \quad (4.52)$$

para el cual resolvemos el sistema de ecuaciones

$$L_i x'_1 + D x'_2 + D_3 = 0 \quad (4.53)$$

$$D x'_1 + L_i x'_2 + D x'_3 = 0 \quad (4.54)$$

$$D x'_1 + D x'_2 + L_i x'_3 = 0 \quad (4.55)$$

con  $L_{12} = \omega^2(m - 1) - D/2m$  correspondiente al valor propio degenerado  $\lambda_{12}$ , y  $L_3 = \omega^2(m - 1) + D/2m$  correspondiente al valor propio  $\lambda_3$ , encontrando

$$x'_1 = \left( \frac{-2D}{L_i} \right) x'_3, \quad x'_2 = x'_3. \quad (4.56)$$

Por último normalizando el vector tal que

$$1 = \langle x'_3 | x'_3 \rangle = \left( \frac{4D^2}{L_i^2} + 2 \right) |x'_3|^2 \quad (4.57)$$

obtenemos los vectores propios

$$\mathbf{x}'_i = \begin{pmatrix} -\frac{1}{D+L_i} \\ \frac{L_i}{2(D+L_i)} \\ \frac{L_i}{2(D+L_i)} \end{pmatrix}, \quad (4.58)$$

dos de los cuales son degenerados para  $i = 1$  y otro para  $i = 2, 3$ .

Finalmente aplicando la matriz de transformación 4.48 obtenemos los vectores propios en las coordenadas originales

$$\mathbf{x}_i = \frac{1}{2\sqrt{6}(D + L_i)} \begin{pmatrix} L_i + \sqrt{2} - 2\sqrt{3} \\ -2 + \sqrt{2} \\ L_i + \sqrt{2} + 2\sqrt{3} \end{pmatrix}. \quad (4.59)$$

### 4.3.3. Quimeras Cuánticas

A diferencia de los sistemas mecánicos clásicos no existe en mecánica cuántica una noción bien definida de lo que son las trayectorias en el espacio de fases, las cuales en el ejemplo anterior, correspondiente a tres péndulos acoplados ante sí, no sirvieron para determinar sus estados quimera. Como consecuencia, se necesitan otro tipos de medidas de sincronización, algunas de las cuales provienen de la teoría de información cuántica [275] a partir de medidas de entrelazamiento (*entanglement*) [276] o de información mutua [277]. Aún así, a pesar de que existen varios estudios teóricos enfocados en la búsqueda de firmas cuánticas de estados sincronizados, no se han encontrado aún manifestaciones cuánticas de estados quimera [278].

En esta sección nos basamos en una medida entrópica de entrelazamiento entre dos subsistemas para los cuales derivaremos la entropía de entrelazamiento .

Partiendo de los valores y vectores propios encontrados en la sección anterior, el estado fundamental del sistema, que denotamos como  $\psi_0(x_1, x_2, \dots, x_N)$  viene determinado por el producto de los estados fundamentales del oscilador armónico simple, cada uno correspondiendo a uno de los valores propios tal que

$$\psi_0(x_1, \dots, x_N) = \prod_i \left(\frac{\lambda_i}{\pi}\right)^{1/4} \exp\left[-\frac{1}{2}\lambda_i x_i^2\right], \tag{4.60}$$

que para nuestro caso con  $i = 1, 2, 3$  nos da

$$\psi_0(x_1, x_2, x_3) = \left(\frac{\lambda_1}{\pi}\right)^{1/4} \exp\left[-\frac{1}{2}\lambda_1 x_1^2\right] \times \left(\frac{\lambda_2}{\pi}\right)^{1/4} \exp\left[-\frac{1}{2}\lambda_2 x_2^2\right] \times \left(\frac{\lambda_3}{\pi}\right)^{1/4} \exp\left[-\frac{1}{2}\lambda_3 x_3^2\right]. \tag{4.61}$$

Una vez se ha obtenido la función de onda para el estado fundamental en nuestro sistema, podemos determinar explícitamente la matriz de densidad reducida<sup>xiv</sup> a partir de su definición estándar

$$\rho_{\text{red}}(x_1, x'_1) = \frac{\int \psi_0(x_1, x_2, x_3) \psi_0^*(x'_1, x_2, x_3) dx_2 dx_3}{\int \psi_0(x_1, x_2, x_3) \psi_0^*(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3}. \tag{4.62}$$

Aunque en este punto por su extensión (y complicación) no prosigamos con el cálculo, evaluando la integral gaussiana y completando el cuadrado se puede obtener finalmente la matriz reducida.

Para proseguir a partir de aquí y para calcular la entropía de entrelazamiento  $S$ , hace falta calcular primero los autovalores  $\rho_{\text{red}}(x_1, x'_1)$ . Después de esto  $S$  se puede obtener a

---

<sup>xiv</sup>La idea de una matriz de densidad reducida surge de considerar dos sistemas  $A, B$ , cada uno habitando en su correspondiente espacio de Hilbert  $\mathcal{H}_A$  y  $\mathcal{H}_B$ . El estado del sistema compuesto viene determinado por  $|\Psi\rangle \in H_A \otimes H_B$ . En general no existe una manera de asociar un estado puro a una componente del sistema  $A$ , no obstante es posible asociarle una matriz de densidad  $\rho_T = |\Psi\rangle \langle\Psi|$ , la cual es un operador de proyección para el sistema. Así el estado  $A$  corresponde a la traza parcial de  $\rho_T$  sobre la base del sistema  $B$ , tal que la matriz reducida  $\rho_A \stackrel{\text{def}}{=} \sum_j \langle j|_B (|\Psi\rangle \langle\Psi|) |j\rangle_B = \text{Tr}_B \rho_T$ .

partir de estos autovalores mediante

$$S = - \sum_n p_n \log p_n. \tag{4.63}$$

Por lo tanto en este punto lo que se necesita es solucionar primero la ecuaciones de autovalores

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dx' \rho_{\text{red}}(x_1, x'_1) f_n(x') = p_n f_n(x) \tag{4.64}$$

donde  $f_n(x)$  es equivalente a los vectores propios obtenidos en 4.59.

En este punto, aunque no hemos realizado el cálculo completo, podemos remitirnos a otros resultados parecidos obtenidos para el mismo tipo de sistemas, en los cuales utilizan la función de pureza (*purity function*) [279]. Esta función se define como un escalar perteneciente a un estado cuántico normalizado tal que

$$\gamma \equiv \text{tr}(\rho^2), \tag{4.65}$$

donde  $\rho$  es la matriz de densidad del estado. Así la pureza nos da información de que tan mezclado es un determinado estado cuántico. Para nuestro sistema dicha función toma la forma

$$\gamma = \int \rho_{\text{red}}(x_1, x'_1) \rho_{\text{red}}(x'_1, x_1) dx_1 dx'_1. \tag{4.66}$$

En [279] tampoco se reportan los cálculos completos (por complicación) pero si se analizan los comportamientos en los límites, para un sistema acoplado de tres osciladores cuánticos, en el caso que las constantes de acoplamiento  $D \rightarrow 0$  y  $D \rightarrow \infty$ . Para estos casos, correspondientes al sistema desacoplado y al sistema máximamente acoplado, encuentran que  $\gamma \rightarrow 1$  y  $\gamma \rightarrow 0$  respectivamente.

El primer caso muestra que el sistema es completamente separable y que por lo tanto no existen estados entrelazados ya que la entropía, calculada mediante  $S = 1 - \gamma = 0$ . Para

el caso con acoplamiento máximo el sistema está máximamente entrelazado ya que  $S = 1$ . Esto nos muestra que existen dos extremos para la función de pureza, y que variando la constante de acoplamiento entre los osciladores del mínimo al máximo se alcanzan estados intermedios de entrelazamiento, lo que se esperaría que ocurriera en un sistema realista.

Por otro lado el oscilador cuántico acoplado para el caso  $N = 2$  si que se ha resuelto analíticamente [280]. Para este sistema se encuentra que los autovalores  $p_n$  correspondientes a la ecuación 4.64 son los siguientes

$$p_n = (1 - \xi^2) \xi^{2n} \tag{4.67}$$

con el parámetro  $\xi$  tomando el valor

$$\xi = \frac{\omega_-^{1/2} - \omega_+^{1/2}}{\omega_-^{1/2} + \omega_+^{1/2}}, \tag{4.68}$$

siendo  $\omega$  los vectores propios definidos por

$$\omega_+ = k_0^{1/2}; \quad \omega_- = (k_0 + 2k_1)^{1/2}, \tag{4.69}$$

correspondientes al hamiltoniano determinado por

$$H = \frac{1}{2} [p_+^2 + p_-^2 + \omega_+^2 x_+^2 + \omega_-^2 x_-^2], \tag{4.70}$$

correspondiente al hamiltoniano genérico para dos osciladores acoplados

$$H = \frac{1}{2} [p_1^2 + p_2^2 + k_0 (x_1^2 + x_2^2) + k_1 (x_1 - x_2)^2]. \tag{4.71}$$

Para examinar este caso tomamos el caso análogo a nuestro sistema, igualmente acoplado pero para  $N = 2$ . Así de esta manera vemos que la ecuación 4.69 para constantes de acoplamiento, que para nuestro caso específico tomamos como iguales  $k_0 = k_1$ , se

transforma tal que el parámetro de la ecuación 4.68 toma el valor

$$\xi = \frac{\sqrt{3k_0} - \sqrt{k_0}}{\sqrt{3k_0} + \sqrt{k_0}} = \frac{\sqrt{3} - 1}{\sqrt{3} + 1} \quad (4.72)$$

Para este caso particular la entropía 4.63 se puede calcular como

$$S(\xi) = - \sum_{n=0}^{\infty} p_n \log p_n = - \log(1 - \xi^2) - \frac{\xi^2}{1 - \xi^2} \log \xi^2 \approx 0,12, \quad (4.73)$$

a partir de la cual podemos calcular un valor para la función de pureza  $\gamma \approx 0,88$ .

Este resultado que acabamos de encontrar nos indica que el sistema simétrico mínimo con entrelazamiento cuántico existe en el caso de dos osciladores armónicos cuánticos idénticos acoplados entre si, y específicamente mediante un acoplamiento entre ellos igual al acoplamiento interno de cada uno de los osciladores ( $k_0 = k_1$ ).

Partiendo de este resultado, en la próxima sección lo interpretaremos dentro del marco inflacionario en cosmología, donde la inflación estira las escalas microscópicas a escalas astronómicas, sugiriendo que las perturbaciones de densidad, semillas para la formación de estructuras a gran escala, pueden venir determinados por el entrelazamiento cuántico en un sistema análogo al que acabamos de exponer para  $N = 2$ .

#### 4.3.4. Fluctuaciones Cuánticas

Recapitulando un poco en los diversos argumentos expuestos con anterioridad, nos damos cuenta que para un sistema clásico mecánico las condiciones mínimas para la existencia de estados de ruptura de simetría en un sistema idénticamente simétrico suceden para el caso de tres osciladores. Por otro lado, explorando el análogo mecánico-cuántico de este sistema para el caso de tres osciladores cuánticos, vemos que en el caso en que estos sean idénticos y estén idénticamente acoplados encontramos un estado de entrelazamiento entre ellos. Más allá de esto, reduciendo el sistema de tres a dos osciladores cuánticos idénticos acoplados con la misma constante de acoplamiento, encontramos que igualmente este sistema exhibe entrelazamiento en su estado fundamental.

Este entrelazamiento emerge, en su caso más general, cuando la función de onda del sistema de partículas en cuestión no se puede representar a través del producto de las funciones de onda de cada partícula. Este hecho condiciona que, aunque nuestro sistema compuesto de dos osciladores sea absolutamente simétrico, uno de los osciladores no se pueda determinar independientemente del otro. Este hecho nos abre la puerta de alguna manera a interpretar este último sistema, de dos osciladores cuánticos, como el análogo al sistema clásico de tres osciladores, ya que ambos en principio son los sistemas mínimos, en su respectiva escala, capaces de generar estados asimétricos en ellos mismos.

Así de esta manera tenemos un sistema clásico simétrico, cuya asimetría viene representada por los estados quimera de sincronía y dessincronía simultáneos; y un sistema cuántico cuántico, cuya asimetría viene representada por los estados de entrelazamiento, en los que una parte constituyente del sistema no puede ser descrita sin considerar la otra, aunque esta última sea exactamente idéntica a la primera.

Por otro lado, los sistemas de osciladores harmónicos acoplados y su transposición a los reinos cuánticos se suele utilizar dentro de la teoría cuántica de campos para representar la naturaleza del vacío, la cual es fundamental en las teorías inflacionarias del Universo<sup>xv</sup>. Así en teoría cuántica de campos se parte normalmente de la ecuación de ondas clásica<sup>xvi</sup> correspondiente a un sistema de masas  $m$ , situadas en los vértices  $a$  de una rejilla, acopladas por muelles con constantes  $k$ , tal que

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - m^2 \phi = 0, \quad (4.74)$$

con velocidad  $c = 1$  y  $m = 1$ , para describir generalmente un campo escalar.

Esta ecuación de onda clásica se puede escribir en términos del lagrangiano clásico  $\mathcal{L}$

---

<sup>xv</sup>Para esta sección utilizamos las clases de cosmología de la Princeton University de Daniel Baumann tituladas “On the Quantum Origin of Structure in the Inflationary Universe”[272]

<sup>xvi</sup>Ejemplo paradigmático del martillo de oro, asociado al dicho popular que enuncia que “cuando la única herramienta que tienes es un martillo, todo problema comienza a parecerse a un clavo”. En este caso el martillo corresponde al oscilador harmónico clásico, uno de los pocos sistemas que los físicos son capaces de resolver exactamente. (Por otro lado extendiendo este dicho, se podría decir que todos los “clavos” en esta tesis están apuntalados con este mismo “martillo”).

de un oscilador harmónico con frecuencia dependiente del tiempo tal que su acción  $\mathcal{S}$  se puede escribir como

$$\mathcal{S} = \int dt \left( \frac{1}{2} \dot{x}^2 - \frac{1}{2} \omega^2(t) x^2 \right) \equiv \int dt \mathcal{L}, \quad (4.75)$$

con  $\omega^2 = k/m$ , y que en el caso más general la constante de acoplamiento depende del tiempo  $k = k(t)$ .

La ecuación clásica del movimiento correspondiente a este lagrangiano se obtiene de la variación de la acción con respecto a la coordenada  $x$  del oscilador tal que

$$\frac{\delta \mathcal{S}}{\delta x} = 0 \implies \ddot{x} + \omega^2(t)x = 0. \quad (4.76)$$

Para la cuantización canónica del sistema se define primeramente el momento conjugado de  $x$  tal que

$$p \equiv \frac{\mathcal{L}}{d\dot{x}} = \dot{x}, \quad (4.77)$$

y se promueven las variables clásicas  $x, p$  a operadores cuánticos  $\hat{x}, \hat{p}$ , tales que su conmutador canónico cumple

$$[\hat{x}, \hat{p}] = [\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x}] = i\hbar. \quad (4.78)$$

La ecuación del movimiento implica que el conmutador es válido para todos los tiempos si se impone una condición inicial. En particular, para nuestro ejemplo tenemos que

$$[x(t), \dot{x}(t)] = i\hbar, \quad (4.79)$$

donde en esta representación de Heisenberg los operadores varían en el tiempo mientras que los estados son independientes del tiempo.

Para seguir con la cuantización se define un operador de modo de expansión tal que

$$\hat{x} = v(t)\hat{a} + v^*(t)\hat{a}^\dagger, \quad (4.80)$$

donde esta expansión de los modos  $v$  se realiza mediante operadores de creación  $\hat{a}$  y aniquilación  $\hat{a}^\dagger$ , la cual satisface la ecuación clásica del movimiento 4.74, que en este caso es igual a

$$\ddot{v} + \omega^2(t)v = 0. \quad (4.81)$$

En este caso el conmutador 4.79 se transforma a

$$\langle v, v \rangle [\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1, \quad (4.82)$$

en el que la notación de brackets se define formalmente como

$$\langle v, w \rangle \equiv \frac{i}{\hbar} (v^* \partial_t w - (\partial_t v^+) w). \quad (4.83)$$

En este punto asumimos que la solución  $v$  se escoge tal que el número real  $\langle v, v \rangle$  es positivo, y éste se puede reescalar tal que  $\langle v, v \rangle \equiv 1$ , y por lo tanto

$$[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1. \quad (4.84)$$

Esta última ecuación corresponde a la relación típica para el oscilador armónico utilizando la notación de Dirac de operadores de creación y aniquilación, los cuales se identifican con el modo de expansión  $v$  a partir de

$$\hat{a} = \langle v, \hat{x} \rangle, \quad \hat{a}^\dagger = -\langle v^*, \hat{x} \rangle, \quad (4.85)$$

mediante los cuales se puede definir el estado vacío  $|0\rangle$  a partir de

$$\hat{a}|0\rangle \equiv 0, \quad (4.86)$$

y los estados excitados de éste a partir de la aplicación del operador de creación tal que

$$|n\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{n!}}(\hat{a}^\dagger)^n|0\rangle, \quad (4.87)$$

donde estos estados son estados propios del operador de número  $\hat{N} = \hat{a}\hat{a}^\dagger$  con valores propios  $n$ .

En este punto podemos observar que la solución de  $v(t)$  es arbitraria, excepto por la normalización que hemos aplicado tal que  $\langle v, v \rangle = 1$ , no obstante un cambio de  $v(t)$  se tiene que acompañar de un cambio en la definición del operador de creación  $\hat{a} = \langle v, \hat{x} \rangle$  de tal manera que la solución global de  $x(t)$  no varíe. Ya que no existe una única elección de los modos de expansión  $v(t)$ , tampoco existe una única descomposición de  $\hat{x}$  en operadores de creación y aniquilación, y eso finalmente nos dice que tampoco existe una única noción de vacío cuántico. Así de esta manera, diferentes soluciones  $v(t)$  nos van a determinar distintos estados de vacío, los cuales como apuntábamos anteriormente son necesarios para una teoría inflacionaria del cosmos.

A continuación describimos un caso especial de oscilador armónico en el que, igual a nuestro caso desarrollado anteriormente, todas sus frecuencias son constantes  $\omega(t) = \omega$ . Para este caso escogemos una  $v(t)$  tal que el estado vacío  $|0\rangle$  sea el estado fundamental del hamiltoniano. Así de esta manera tenemos básicamente el hamiltoniano de un oscilador armónico descrito por

$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{1}{2}\hat{p}^2 + \frac{1}{2}\omega^2\hat{x}^2, \quad (4.88)$$

el cual en términos de una  $v$  general se puede escribir como

$$\hat{\mathcal{H}} = \frac{1}{2} [(\dot{v}^2 + \omega^2 v^2) \hat{a} \hat{a} + (\dot{v}^2)^* \hat{a}^\dagger \hat{a}^\dagger + (|\dot{v}|^2 + \omega^2 |v|^2)(\hat{a} \hat{a} + \hat{a}^\dagger \hat{a}^\dagger)]. \quad (4.89)$$

Así utilizando 4.86 y 4.84, encontramos que la acción del hamiltoniano sobre un estado vacío  $|0\rangle$  nos lleva a

$$\hat{\mathcal{H}}|0\rangle = \frac{1}{2}(\dot{v}^2 + \omega^2 v^2)^* \hat{a}^\dagger \hat{a}^\dagger |0\rangle + \frac{1}{2}(|\dot{v}|^2 + \omega^2 |v|^2)|0\rangle. \quad (4.90)$$

Por otro lado, el requerimiento que  $|0\rangle$  sea un estado propio del hamiltoniano  $\hat{\mathcal{H}}$  implica que el primer término de la ecuación anterior tiene que ser cero, lo que nos lleva a la condición

$$\dot{v} = \pm i\omega v. \quad (4.91)$$

Para esta condición la norma<sup>xvii</sup> de  $v$  nos lleva a que

$$\langle v, v \rangle = \mp \frac{2\omega}{\hbar} |v|^2, \quad (4.92)$$

y el hecho que la norma tiene que ser siempre positiva  $\langle v, v \rangle > 0$  selecciona el signo menos de la ecuación 4.91, lo cual nos conduce a una solución positiva de la frecuencia para la ecuación del movimiento tal que

$$v(t) = \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}} e^{-i\omega t}. \quad (4.93)$$

De esta manera esta selección del modo de expansión a través de la función  $v$  hace

---

<sup>xvii</sup>Recordemos aquí que los espacios de Hilbert son espacios normados, en los que para dos vectores que habitan en este espacio siempre se cumple la desigualdad de Cauchy-Schwarz  $|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \|y\|$  y completos, i.e. donde una serie de vectores cumple el criterio de convergencia  $\sum_{k=0}^{\infty} \|u_k\| < \infty$ .

que el hamiltoniano se transforme a

$$\hat{\mathcal{H}} = \hbar\omega \left( \hat{N} + \frac{1}{2} \right), \quad (4.94)$$

que para el estado vacío  $|0\rangle$  corresponde al estado de mínima energía  $\hbar\omega/2$ , el cual observamos que es diferente de cero, reafirmandonos finalmente que el vacío posee una energía. No obstante si no hubiéramos elegido 4.93 para expandir el operador de posición, entonces el estado aniquilado por  $\hat{a}$  no correspondería al estado fundamental de nuestro oscilador.

Finalmente de esta manera, y con esta elección particular para el operador de posición  $\hat{x}$  a partir de su expansión mediante  $v$ , podemos calcular las fluctuaciones cuánticas alrededor del estado vacío. Considerando el promedio del valor esperado del operador de posición  $\hat{x}$  para el estado vacío  $|0\rangle$ , tenemos que

$$\langle |\hat{x}^2| \rangle \equiv \langle 0 | \hat{x} \hat{x}^\dagger | 0 \rangle, \quad (4.95)$$

expresión que podemos expandir de la siguiente manera

$$\langle 0 | \hat{x} \hat{x}^\dagger | 0 \rangle = \langle 0 | (v^* \hat{a}^\dagger + v \hat{a})(v \hat{a} + v^* \hat{a}^\dagger) | 0 \rangle = |v(\omega, t)|^2 \langle \hat{a} \hat{a}^\dagger | 0 \rangle = |v(\omega, t)|^2 \langle [\hat{a}, \hat{a}^\dagger] | 0 \rangle = |v(\omega, t)|^2, \quad (4.96)$$

lo que finalmente, a partir de 4.93, caracteriza las fluctuaciones cuánticas en el vacío alrededor de la posición del oscilador, conocidas como fluctuaciones punto-cero, a partir de

$$\langle |\hat{x}^2| \rangle = |v(\omega, t)|^2 = \frac{\hbar}{2\omega}. \quad (4.97)$$

Ahora bien, ¿que significa esta última ecuación?. Para responder a esta pregunta nos tenemos que remitir al famoso principio de indeterminación de Heisenberg, el cual nos dice que en general no es posible predecir el valor de una variable física con certeza incluso si

se especifican las condiciones iniciales.

Este principio se puede escribir, para el caso en que estas variables sean las variables conjugadas de posición y momento, como

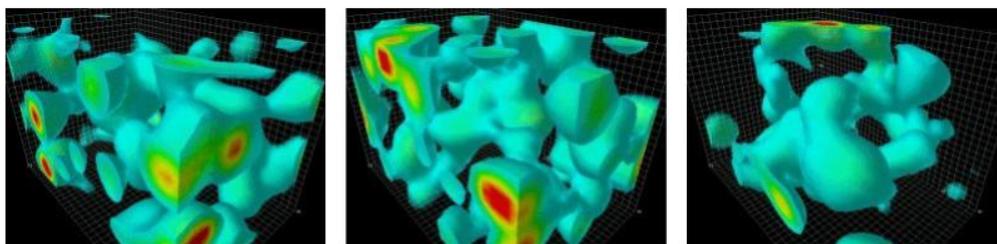
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (4.98)$$

donde  $\Delta x$  corresponde a la desviación estándar de  $x$ , la cual se calcula a partir de  $\Delta x = \sqrt{\langle |\hat{x}^2| \rangle - \langle \hat{x} \rangle^2}$ , y análogamente para  $\Delta p = \sqrt{\langle |\hat{p}^2| \rangle - \langle \hat{p} \rangle^2}$ .

Para nuestro caso anterior, suponiendo que  $\langle |\hat{p}^2| \rangle = \hbar\omega/2$ , correspondiente a lo que se conoce como un estado coherente balanceado (con la misma indeterminación en  $\Delta x$  que en  $\Delta p$ ), nos da que

$$\Delta x \Delta p = \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}} \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2}} = \frac{\hbar}{2}, \quad (4.99)$$

ya que  $\langle \hat{x} \rangle = \langle \hat{p} \rangle = 0$ , lo cual corresponde a la mínima indeterminación de nuestro sistema para el estado fundamental (conocida como límite de Kennard). Esta desviación estándar  $\Delta x$  nos habla también sobre la precisión al realizar una medida del observable posición  $\hat{x}$ . Esto convierte de alguna manera el dibujo anterior del campo clásico, descrito por la ecuación 4.74 a través de una malla compuesta de partículas, en una especie de nube difusa de probabilidades (ver figura 4.18). Cuando medimos la posición de una partícula en esta nube, es probable que en esta medición (la cual colapsa la función de onda de la partícula) se genere una asimetría espacial en el sistema, i.e. una fluctuación que a la vez genera una fluctuación en la densidad de materia. Finalmente esta fluctuación de la densidad es la condición necesaria que comentábamos para generar esas semillas ligeramente más densas que su entorno, las cuales a la vez se amplifican para crear las estructuras del Universo actual.



**Figura 4.18:** Visualización en 3D de la evolución de fluctuaciones cuánticas en el vacío.  
<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/index.html>

### 4.3.5. Fluctuaciones Inflacionarias

Tal como hemos visto hasta ahora el vacío cuántico no está vacío sino lleno de fluctuaciones ubicuas, resultantes del principio de Heisenberg inherente en mecánica cuántica. Por otro lado estas fluctuaciones se pueden entender a partir de la creación y aniquilación aleatoria de pares virtuales de partículas y antipartículas. Éstos aparecen y desaparecen continuamente: se crean de la “nada” para instantes después aniquilarse entre ellos (remarcar precisamente que en este punto la “nada” corresponde a la nada absoluta, situándonos en la tabla siguiente en la época de inicio de la inflación).

Esta creación de pares de partículas genera efectos interesantes cuando consideramos un Universo en su estado inflacionario. Tal como vemos en la tabla inferior, esta inflación se especula que inicia alrededor de  $10^{-42}s$  después del Big-Bang y finaliza  $10^{-32}s$  segundos después del Big-Bang. Durante este período se especula que el Universo se expandió exponencialmente, supuestamente por un factor aproximado de  $10^{26}$ . Para ponerlo un poco en escala, esta inflación actuando sobre un virus (digamos por ejemplo SARS-CoV-2, con un tamaño aproximado de  $100nm$ ) haría que éste se estirara en  $10^{-32}s$  hasta la galaxia más cercana a la Tierra (Enana del Can Mayor, situada 25000 años luz).

Este cálculo de escala (que en este momento también hace que se nos estiren las neuronas), lo podemos emplazar en analogía a un fenómeno más cercano (y exótico a la vez): la radiación de Hawking en un agujero negro. En éste nos podemos imaginar la creación de un par partícula - antipartícula cercano a su horizonte de eventos. En este

punto puede suceder que una de las dos partículas cruce el horizonte, hacia el punto de no retorno, y que la segunda partícula pierda a su compañera por aniquilación y se convierta en una partícula real. Este fenómeno es el que un observador externo percibiría como radiación térmica de Hawking proveniente del agujero negro<sup>xviii</sup>.

$t$	$\rho^{1/4}$	Evento
$10^{-43}\text{s}$	$10^{19}\text{GeV}$	Escalas de Planck
$10^{-42}\text{s}$	$10^{18}\text{GeV}$	Empieza la Inflación?
$10^{-32\pm 6}\text{s}$	$10^{13\pm 3}\text{GeV}$	<b>Finaliza la Inflación?</b>
$10^{-18\pm 6}\text{s}$	$10^{6\pm 3}\text{GeV}$	Empieza el Big Bang Caliente?
$10^{-10}\text{s}$	$100\text{GeV}$	Transición de fase Electrodebil?
$10^{-4}\text{s}$	$100\text{MeV}$	Transición de fase Quark-Hadron?
$10^{-2}\text{s}$	$10\text{MeV}$	$\gamma, \nu, e, \bar{e}, n,$ and $p$ en equilibrio térmico
$1\text{s}$	$1\text{MeV}$	$\nu$ desacoplamiento, $e\bar{e}$ anihilación
$100\text{s}$	$0,1\text{MeV}$	Nucleosynthesis (BBN)
$10^4\text{yr}$	$1\text{eV}$	Igualdad materia-radiación
$10^5\text{yr}$	$0,1\text{eV}$	<b>Desacople fotones (CMB)</b>
$\sim 10^9\text{yr}$	$10^{-3}\text{eV}$	Primeras estructuras
Ahora	$10^{-4}\text{eV}(2,73\text{K})$	El presente

Por otro lado, en las condiciones extremas de la inflación sucede un fenómeno análogo. En el espacio-tiempo, determinado en cosmología mediante un espacio que se conoce como espacio de de Sitter, éste posee un horizonte constante  $H^{-1}$  (constante de Hubble).

<sup>xviii</sup>Curiosamente esta radiación térmica de Hawking se ha empezado a estudiar recientemente a partir de analogías con el sonido, mediante agujeros negros sónicos en teorías de gravedad análoga. En éstas las perturbaciones del sonido son similares a las de la luz dentro de un agujero negro gravitatorio, y el fluido es aproximadamente un fluido perfecto análogo a la gravedad. En 2014 se detectó la emisión de Hawking autoamplificada en un sistema de gravedad análoga utilizando un condensado de Bose-Einstein [281]

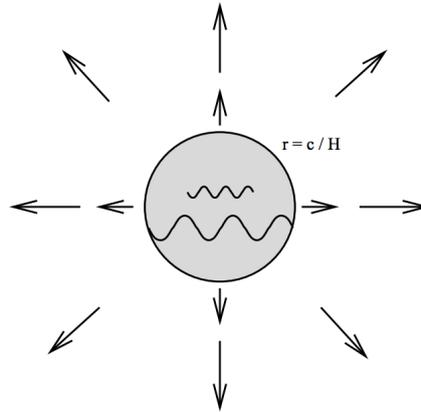
Durante la inflación el espacio se expande exponencialmente,  $a(t) \propto e^{Ht}$  (en las secciones anteriores habíamos utilizado el símbolo  $r(t)$  para la expansión en vez de  $a(t)$ , símbolo normalmente utilizado en cosmología). Así dos puntos vecinos dentro del horizonte se estiran rápidamente hacia una separación más grande que el horizonte. Si imaginamos en este punto la creación de un par partícula-antipartícula dentro del horizonte de de Sitter, vemos que la expansión exponencial del espacio lo separa rápidamente a una distancia más grande que el horizonte. Debido a que en este momento las partículas quedan causalmente desconectas entre ellas, éstas no se pueden aniquilar y por lo tanto se convierten en partículas reales. Estas partículas finalmente son las que describen las fluctuaciones cuánticas que veíamos en la sección anterior, pero habitando en este caso un espacio de de Sitter, y las que en última instancia desencadenan las fluctuaciones primordiales clásicas.

Para entender un poco en más detalle este último fenómeno vamos a describir a a continuación como estos pares de partículas representan excitaciones que emergen de un campo cuántico, conocidas como inflatones, y en las que su creación genera estados de entrelazamiento cuántico a grandes distancias. Para ello partimos de nuevo de la analogía con el oscilador armónico cuántico estudiado en la sección anterior.

Generalmente el campo del inflatón  $\phi(t, \mathbf{x})$  se descompone en un campo de fondo  $\phi(t)$  (correspondiente a un vacío completamente homogéneo) y en una perturbación de muy pequeña escala  $\delta\phi(t, \mathbf{x})$  alrededor de éste (la cual depende de la posición  $\mathbf{x}$  y genera los inflatones a modo de creación de partículas). Así el campo del inflatón viene descrito por

$$\phi(t, \mathbf{x}) = \phi(t) + \delta\phi(t, \mathbf{x}). \quad (4.100)$$

Observamos que en esta ecuación  $\delta\phi$  es análogo a la coordenada de posición  $x$  del ejemplo anterior del oscilador armónico. Para este caso particular representamos  $\delta\phi$  mediante su expansión en componentes (modos) de Fourier,  $\delta\phi_k$ , donde  $k/a \approx \lambda^{-1}$  es el número de onda de cada uno de los modos de Fourier, correspondientes al inverso a la longitud de onda. En este punto, sin derivarlo explícitamente (ver [269]), mostramos que



**Figura 4.19:** Horizonte de eventos en el espacio de de Sitter. Las partículas fuera de la esfera  $r = c/H$  nunca pueden recibir señales (de luz) desde el origen, ni tampoco un observador en el origen puede recibir información de fuera de la esfera. La expansión exponencial  $a(t) \propto e^{Ht}$  se acelera rápidamente de manera que un conduce a cualquier observador al punto en que la recesión al origen es efectivamente superluminal (i.e. para comunicar a dos observadores en este punto haría falta una señal que viajar más rápidamente que  $c$ ). Por otro lado, el tren de ondas representa la generación de fluctuaciones en este espacio-tiempo. Las ondas con  $\lambda \ll c/H$  (definiendo  $c/H = H^{-1}$  para  $c = 1$ , llamado radio de Hubble) ocupan una región de espacio plano y por lo tanto ahí se generan las fluctuaciones cuánticas normales en un estado vacío (las vistas en la sección anterior en el oscilador armónico cuántico). A medida que estos modos (fijados a una longitud de onda comòvil, la cual no varía con la expansión del espacio-tiempo) se expanden a longitudes  $\lambda \gg c/H$  ( $\lambda \gg H^{-1}$ ), y en este punto la causalidad fuerza a las fluctuaciones cuánticas a “congelarse” a una amplitud que finalmente deviene la semilla para las estructuras a gran escala.

$\delta\phi_k$  corresponde a

$$\delta\ddot{\phi}_k + 3H\dot{\phi}_k + \frac{k^2}{a^2}\delta\phi_k = 0, \tag{4.101}$$

ecuación que tiene la forma idéntica a la ecuación del oscilador armónico con masa  $m = 1$ , un muelle con constante de acoplamiento  $k/a$  variable (donde en este caso  $a$  corresponde al factor de escala de expansión (recordemos de <sup>viii</sup> que  $H \equiv \dot{a}/a$  es la constante de Hubble) y con coeficiente de amortiguamiento  $3H$  variable (con  $H$  siendo la constante de Hubble).

Tal como indicamos en la figura 4.19, este sistema se comporta de dos maneras. Una cuando la longitud de onda  $\lambda \approx a/k$ , correspondiente al punto donde el modo de oscilación es mucho más pequeño que el radio de Hubble (recordemos  $\lambda \ll H^{-1}$ ), en el cual el modo se comporta como un oscilador armónico sin amortiguamiento. En el caso contrario, en que la longitud de onda es mucho más grande que el radio de Hubble (recordemos  $\lambda \gg H^{-1}$ ), entonces el sistema se comporta como un oscilador sobreamortiguado, donde su velocidad  $\dot{\delta}_k$  decae rápidamente a cero y su amplitud se “congela”.

Ahora, de la misma manera en que hemos calculado anteriormente las fluctuaciones del vacío de  $x$ , podemos calcular las fluctuaciones de  $\delta\phi$ . Para el oscilador armónico encontramos anteriormente que  $\langle |\hat{x}^2| \rangle \propto 1/\omega$ . De la misma manera esperamos que un nuestro campo de inflatones  $(\delta\phi)^2 \propto 1/(k/a) \propto \lambda$ .

Primero de todo podemos ver cualitativamente que las fluctuaciones  $\delta\phi$  se originan en escalas del subhorizonte  $k \gg aH$  ( $\lambda \ll H^{-1}$ ), donde éstas representan soluciones oscilantes cuya amplitud varía con la longitud de onda. Después, a medida que el modo de oscilación estira esta longitud de onda debido a la inflación, la amplitud del estado vacío incrementa hasta el punto en que la longitud de onda se iguala a la constante del radio de Hubble, tal que en  $k = aH$ . En este momento sucede que la amplitud se “congela” a un valor constante a medida que el oscilador se sobreamortigua en escalas acausales (i.e. en las que ya no existe una relación de causalidad debido a que se encuentra separado por el radio de Hubble). Esta amplitud “congelada” ya fuera del radio de Hubble viene determinada por una perturbación clásica, en un escala que ahora si es causal, a partir de

$$(\delta\phi)^2 \propto \frac{1}{a_\star^3(k/a)_\star}. \quad (4.102)$$

Sin entrar en detalles, comentamos que en esta última ecuación el factor  $a_\star^3$  proviene de la normalización del lagrangiano del  $\phi$  tal que  $\mathcal{L} \propto \dot{\phi}^2 a^3/2$  y corresponde al valor del factor de escala de expansión en el tiempo en que el modo de oscilación cruza el radio de Hubble ( $k = aH$ , y  $\lambda \approx H^{-1}$ ) desde la región del subhorizonte ( $k \gg aH$ , y  $\lambda \ll H^{-1}$ ),

definido a partir de las coordenadas estrella, correspondientes a  $k = aH$ , tal que

$$k = a_* H_* \tag{4.103}$$

Finalmente combinando ambas ecuaciones obtenemos la ecuación

$$(\delta\phi)^2 \propto \frac{H_*^2}{k^3}, \tag{4.104}$$

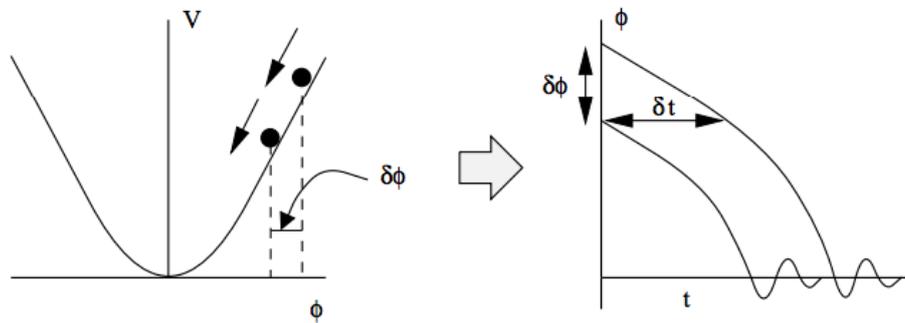
correspondiente al espectro invariante de escala de las fluctuaciones de un inflatón.

Estos inflatones, con una amplitud distinta a cero y “congelada” al cruzar el radio Hubble, finalmente son los que en la época conocida como época de recalentamiento, decaen a partículas del modelo estándar (las cuales ya han adquirido una indeterminación en su posición y pueden posteriormente generar perturbaciones de densidad anisotrópicas debido a la indeterminación de Heisenberg “clásica”, i.e. no inflacionaria, descrita por el oscilador armónico cuántico).

Para interpretar más fácilmente la ecuación 4.104 podemos imaginar que el efecto principal de las fluctuaciones es hacer que diferentes partes del Universo correspondan a campos  $\phi$  perturbados ligeramente a partir de una cantidad  $\delta\phi$ . Desde un punto de vista temporal este comportamiento se puede entender como si copias idénticas de un mismo campo  $\phi(t)$  (correspondientes al campo inflacionario homogéneo del vacío de la ecuación 4.100) se observaran a diferentes tiempos debido a la perturbación  $\delta\phi$  sobre  $\phi$ , la cual hace que unos puntos viajen más rápido que otros, tal que

$$\dot{\phi}(t) \pm \frac{\delta(t, \mathbf{x})\phi}{\delta t}. \tag{4.105}$$

Este Universo por lo tanto finaliza la época de inflación a diferentes tiempos, desencadenando una dispersión en la densidad de energía, tal como podemos ver en la figura 4.20.



**Figura 4.20:** Esta gráfica muestra como fluctuaciones en el campo escalar inflacionario se transforman a fluctuaciones de densidad al final de la época inflacionaria. Diferentes puntos del Universo se inflan a partir de puntos donde el potencial está perturbado por  $\delta\phi$ , similar a dos partículas rodando a partir de diferentes puntos de inicio. La inflación finaliza a tiempos separados entre si por  $\delta t$  para estos dos puntos, induciendo una fluctuación en la densidad.

Antes de finalizar esta sección hacemos una analogía a partir de los ruidos que estudiamos a lo largo del primer capítulo de esta tesis. En la ecuación 4.104 decíamos que estas perturbaciones son invariantes de escala, pero ¿que significa concretamente este hecho?

El argumento intuitivo para una invariancia de escala en un espacio de de Sitter significa que este espacio es invariante bajo traslaciones, i.e. no puede existir una referencia de origen natural para el tiempo en un Universo que se expande exponencialmente. Esto significa que a un tiempo determinado, la única escala de longitud relevante en este modelo pertenece al tamaño del horizonte dado por el radio de Hubble como  $H^{-1}$ . De esta manera resulta inevitable que las fluctuaciones que existan en esta escala sean iguales para todos los tiempos.

A partir del argumento de causalidad por otro lado, se supone que estas fluctuaciones en la métrica tienen que ser copiadas inalteradamente a escalas mayores en las que el Universo se expande. Esto implica que las fluctuaciones en la métrica reciben los mismos niveles de distorsión para cada perturbación de frecuencia. Esto finalmente nos sugiere el hecho que la apariencia del Universo en este punto es independiente de la escala en que se observa.

Por otro lado, el uso del término invariante de escala para el Universo inflacionario implica que este Universo sea considerado en cierto sentido como fractal. Esto a la vez nos indica que éste tiene las mismas desviaciones exactas en la métrica independientemente de la escala de resolución espacial en que lo observemos. Este hecho si lo observamos a partir de una ley de escala general para la potencia espectral  $P(k)$  implica que

$$P(k) \propto k^n, \tag{4.106}$$

que, tal como veíamos en 1, para el caso de un ruido que no tenga correlaciones, equivale a un ruido blanco con  $n = 0$ . Así experimentalmente se ha restringido este valor a

$$P(k) \propto k^{n_s-1}, \quad n_s = 0,91_{-0,07}^{+0,15}, \tag{4.107}$$

lo que finalmente nos da  $P(k) \propto k^{-0,09}$ , un ruido casi idéntico al ruido blanco .

### 4.3.6. Inflatones Quimera

En esta última sección del capítulo, vamos a interpretar los análisis anteriores en términos de los estados de entrelazamiento, los cuales en la sección 4.3.3, enmarcábamos dentro de lo que se podía llegar entender como estados quimera pertenecientes a un sistema cuántico.

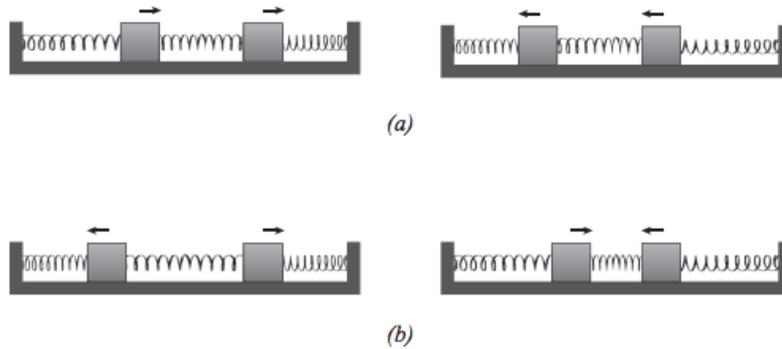
En ese análisis nos dimos cuenta que el estado mínimo capaz de sostener dicho entrelazamiento proviene del sistema compuesto por dos osciladores cuánticos armónicos idénticos y acoplados entre si mediante la misma constante de amortiguación. En dichos estados encontramos que éstos toman los valores propios  $\omega_+ = \sqrt{k_0}$  y  $\omega_- = \sqrt{k_0 + 2k_1}$ , y que en el caso en que ambos osciladores estén acoplados por el mismo resorte interno y externo entre ellos nos conduce a que  $\omega_- = \sqrt{3k_0}$ .

Esto a la vez, para el hamiltoniano que describíamos en la ecuación 4.71, nos conduce

a un hamiltoniano reducido

$$H = \frac{1}{2} [p_1^2 + p_2^2 + k_0 (x_1^2 + x_2^2) + k_1 (x_1 - x_2)^2], \quad (4.108)$$

en el cual representamos gráficamente su comportamiento clásico en la figura 4.21.



**Figura 4.21:** Representación gráfica de los cuatro modos de oscilación posibles para el sistema clásico descrito por el hamiltoniano 4.108.

De la misma manera que en la sección 4.3.3, calculamos el entrelazamiento del sistema a través de la matriz de densidad reducida para el estado fundamental, en esta sección vamos a calcular la indeterminación de dicho sistema en analogía a las indeterminaciones calculadas para el oscilador armónico cuántico, pero entendidas como una perturbación inflacionaria en un Universo en expansión.

Para ello reescribimos el hamiltoniano 4.108 en términos de las coordenadas pertenecientes los modos normales  $x_{\pm}$  y  $p_{\pm}$  tal que

$$x_{\pm} = \frac{x_1 + x_2}{\sqrt{2}}, \quad p_{\pm} = \frac{p_1 + p_2}{\sqrt{2}}. \quad (4.109)$$

Tal como veíamos, la función de onda correspondiente al estado fundamental del sistema se puede escribir como el producto de los modos normales en sus estados fundamentales

de manera que

$$\Psi(x_{\pm}, t) = \left(\frac{m^2\omega_+\omega_-}{\pi^2\hbar^2}\right)^{1/4} \exp\left(-\frac{m\omega_+}{2\hbar}x_+^2\right) \exp\left(-\frac{m\omega_-}{2\hbar}x_-^2\right) \exp\left(-\frac{i}{2}(\omega_+ + \omega_-)t\right), \quad (4.110)$$

Recordando que los modos normales de las frecuencias vienen dados por  $\omega_+ = \sqrt{k_0}$  y  $\omega_- = \sqrt{k_0 + 2k_1}$ , y tomando el caso particular  $k_0 = k_1$ , tenemos que  $\omega_- = \sqrt{3k_0}$ . Ahora calculamos la distribución de probabilidad para la posición para un oscilador, con el sistema en dicho estado, integrando la densidad de probabilidad a lo largo de la coordenada del otro oscilador, tal que

$$P_1(x_1, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_0^*(x_{\pm}, t)\Psi_0(x_{\pm}, t)dx_2 \quad (4.111)$$

$$= \left(\frac{m^2\omega_+\omega_-}{\pi^2\hbar^2}\right)^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{m\omega_+}{2\hbar}(x_1 + x_2)^2\right) \exp\left(-\frac{m\omega_-}{2\hbar}(x_1 - x_2)^2\right) dx_2 \quad (4.112)$$

$$= \left(\frac{2m\omega_+}{\pi^2\hbar^2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{2m\omega_+}{\hbar\left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)}x_1^2\right). \quad (4.113)$$

Esta última ecuación corresponde a una distribución de probabilidad gaussiana con desviación estándar

$$\Delta_x^{(1)} = \sqrt{\left(\frac{\hbar}{2m\omega_+}\right)\left(\frac{1 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)}. \quad (4.114)$$

Igualmente podemos calcular la distribución de probabilidad para el caso del momento de un oscilador de manera similar, utilizando la simetría bajo la transformación  $m\omega x \leftrightarrow$

$p/\sqrt{m\omega}$  para obtener

$$\Delta_p^{(1)} = \sqrt{\left(\frac{\hbar m \omega_+}{2}\right) \left(\frac{1 + \sqrt{3}}{2}\right)}. \quad (4.115)$$

Tomando el caso particular  $m = 1$  y redefiniendo  $\omega = \omega_+$ , obtenemos finalmente que

$$\Delta_x^{(1)} = \sqrt{\left(\frac{\hbar}{2\omega}\right) \left(\frac{1 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}}\right)}, \quad \Delta_p^{(1)} = \sqrt{\left(\frac{\hbar\omega}{2}\right) \left(\frac{1 + \sqrt{3}}{2}\right)}. \quad (4.116)$$

En este punto, a partir del principio de indeterminación de Heisenberg calculamos  $\Delta_x^{(1)}\Delta_p^{(1)}$ , lo cual nos da

$$\Delta_x^{(1)}\Delta_p^{(1)} = \frac{\hbar}{2} \left(\frac{1 + \sqrt{3}}{2(\sqrt{3})^{1/2}}\right) \simeq 1,038 \left(\frac{\hbar}{2}\right) > \frac{\hbar}{2}. \quad (4.117)$$

Finalmente analizando estos resultados observamos que el acoplamiento incrementa la incertidumbre del oscilador individual. Por lo tanto el resultado final para el estado fundamental del sistema acoplado hace que:

- Decrezca la incertidumbre de la posición del oscilador individual.
- Incremente la incertidumbre del momento del oscilador.
- Incremente la incertidumbre del producto  $\Delta_x^{(1)}\Delta_p^{(1)}$  por encima del valor de la incertidumbre mínima  $\hbar/2$ .
- Se rompa la simetría del estado coherente, ya que la contribución de  $\Delta_x^{(1)}$  no está balanceada con la de  $\Delta_p^{(1)}$  como en el caso anterior del oscilador armónico cuántico simple.

A continuación vamos a interpretar estos resultados dentro del marco de las fluctuaciones cuánticas en el modelo inflacionario que vimos anteriormente. Remarcamos antes que nada el carácter naíf de la siguiente interpretación.

Análogamente como hicimos en 4.3.4, podemos partir del hamiltoniano del oscilador acoplado descrito en 4.108, para encontrar las ecuaciones del movimiento y realizar la cuantización canónica a partir de las variables conjugadas de posición y momento en términos de operadores de creación y aniquilación.

Sin la necesidad de realizar dicho cálculo, podemos comparar la fluctuación que encontramos en 4.3.4 de la posición en el estado vacío

$$\langle |\hat{x}^2| \rangle = \frac{\hbar}{2\omega}, \quad (4.118)$$

con la fluctuación del estado fundamental para nuestro caso del oscilador acoplado

$$\langle |\hat{x}^2| \rangle^{(1)} = \frac{\hbar}{2\omega} \left( \frac{1 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right), \quad (4.119)$$

observando finalmente que

$$\langle |\hat{x}^2| \rangle > \langle |\hat{x}^2| \rangle^{(1)}. \quad (4.120)$$

Ahora bien, si especulamos que el campo perturbado de los inflatones, descrito anteriormente en el espacio de de Sitter, a partir de  $\delta\phi$  es análogo a la coordenada de posición  $x$ , ya no en el oscilador armónico simple (como en el caso descrito en 4.3.5 por  $(\delta\phi)^2$ ) sino al oscilador armónico acoplado anterior, obtenemos un espectro invariante de escala para las fluctuaciones de un inflatón acoplado  $(\delta\phi)^{2(1)}$ .

Análogamente a 4.120, tenemos que para el caso inflacionario se tendría que cumplir

$$(\delta\phi)^{2(1)} < (\delta\phi)^2 \sim \frac{H^2}{k^3}, \quad (4.121)$$

tal que la indeterminación del inflatón acoplado es menor a la del inflatón simple descrito en 4.3.5, pero ¿cómo podemos interpretar este resultado de la ecuación 4.121?

Consideremos que nuestro sistema de inflatones acoplados descrito por el hamiltoniano en 4.108 se puede dividir en dos subsistemas, digamos  $A$  y  $B$ . Si consideramos el espacio

de Hilbert total, en el cual habita el vector de estado del sistema, vemos que este se puede dividir en dos subespacios

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B, \tag{4.122}$$

que en nuestro caso de dos inflatones corresponde a  $A = 1$  y  $B = 2$ . Así de esta manera podemos denotar a la base de los vectores de estado en  $\mathcal{H}_1$  a partir de  $|\psi_n\rangle_1$  y a la base de los vectores de estado en  $\mathcal{H}_2$  a partir de  $|\phi_m\rangle_2$ . Así el estado total del sistema  $|\Psi\rangle$  se puede expresar en términos generales como la superposición del producto tensorial entre las bases de los dos subsistemas tal que

$$|\Psi\rangle = \sum_{n,m} C_{nm} |\psi_n\rangle_1 \otimes |\phi_m\rangle_2. \tag{4.123}$$

En general no es posible describir los estados de los dos subsistemas independientemente de cada uno, pero en el caso en que si es posible tenemos un estado separable o un producto de estados.

Matemáticamente esto significa que se pueden escribir cada uno de los elementos de la matriz de coeficientes  $C_{nm}$  de la siguiente manera

$$C_{nm} = c_{1,n} c_{2,m} \quad \forall n, m, \tag{4.124}$$

donde  $c_{1,n}$  y  $c_{2,m}$  son conjuntos de coeficientes que satisfacen el criterio de normalización estándar

$$\sum_n |c_{1,n}|^2 = \sum_m |c_{2,m}|^2 = 1. \tag{4.125}$$

Así el estado del sistema compuesto se puede escribir como

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_{1,n} |\psi_n\rangle_1 \otimes \sum_m c_{2,m} |\phi_m\rangle_2, \tag{4.126}$$

donde el sistema compuesto existe como un estado separable en dos subsistemas, y por lo tanto no existe un entrelazamiento entre el subsistema 1 y el subsistema 2. En el caso contrario, en el que no se cumple la ecuación 4.124, tenemos un estado entrelazado, como en el caso de nuestro sistema acoplado.

Busquemos ahora una manera explícita de describir nuestro vector de estado para el sistema acoplado en su estado fundamental en forma de ecuación 4.123. Para ello podemos describir nuestro hamiltoniano 4.108 en términos de operadores de destrucción y aniquilación.

Dicho de otra manera, lo que queremos es expresar  $|0\rangle$  en función de los operadores de escalera que están confinados en el espacio  $\mathcal{H}_1$  o bien en  $\mathcal{H}_2$ , lo que a la vez es equivalente a buscar una expresión del tipo

$$|0\rangle = \sum_{n,m} C_{nm} |n\rangle_n \otimes |m\rangle_m. \tag{4.127}$$

El desarrollo detallado de los siguientes cálculos se refiere por extensión en el anexo D. Anticipando la forma de los operadores de escalera escribimos que estos se describen mediante

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \left( x_1 + \frac{i}{\omega} p_1 \right), \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \left( x_2 + \frac{i}{\omega} p_2 \right), \tag{4.128}$$

que para nuestro caso

$$\omega = (\omega_+ \omega_-)^{1/2} = 3k_0^2, \tag{4.129}$$

y

$$\xi = \frac{\omega_-^2 - \omega_+^2}{\omega_-^2 + \omega_+^2} = \frac{\sqrt{3} - 1}{\sqrt{3} + 1}. \tag{4.130}$$

A partir de aquí, siguiendo el desarrollo en el anexo D, se puede llegar a la expresión

siguiente

$$|0\rangle = \sqrt{1 - \xi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \xi^n |n\rangle_1 \otimes |n\rangle_2, \quad (4.131)$$

que para nuestro caso particular nos da el siguiente estado entrelazado para el estado fundamental

$$|0\rangle = \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{3} - 1}{\sqrt{3} + 1}\right)^2} |0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2, \quad (4.132)$$

el cual vendría a describir dos partículas idénticas acopladas y entrelazadas en su estado fundamental.

Imaginemos ahora que estas partículas corresponden a dos inflatones pertenecientes a la perturbación del campo inflacionario  $\delta\phi$  sobre su estado vacío. Así, a diferencia del modelo inflacionario estándar donde un inflatón genera una espectro de fluctuaciones invariantes de escala, podemos imaginar un estado ligado de dos inflatones que generan dos espectros de fluctuaciones invariantes, pero esta vez con una correlación (o decoherencia) entre estos espectros debida al estado de entrelazamiento de los dos inflatones.

Tal como veíamos antes, durante la inflación la perturbación del inflatón sin masa  $\delta\phi$  se estira más allá de la región de expansión de Hubble. De esta manera transitando desde las regiones de dentro del radio de Hubble hasta fuera de éste, justo cuando el número de onda cruza este radio, se encuentra la solución que veíamos en 4.121.

En este punto suponemos que si se elige un sistema compuesto por dos inflatones acoplados, la fluctuación del campo del inflatón va a ser menor que en el caso del inflatón individual. Para calcular realmente la contribución de nuestro modelo al espectro  $P(k)$  proveniente de la perturbación  $\delta\phi_{(1)}$  se tendría que volver a cuantizar el campo para el caso de nuestro modelo acoplado. A partir de ahí se tendría que calcular el modo de expansión, después  $\langle\delta\phi^2\rangle$  y finalmente la potencia espectral  $\Delta^2(k) \equiv k^2\langle\delta\phi^2\rangle/2\pi^2$ . Aunque en este punto no derivemos dicho cálculo, la desigualdad en la ecuación 4.121, nos indica que aunque el espectro de fluctuaciones sea menor en nuestro caso (ya que la indeterminación

en la posición del sistema de dos inflatones es menor a la del caso con un solo inflatón), éste tendría que seguir obedeciendo una ley de escala, correspondiente a la potencia espectral de las perturbaciones, similar a  $P(k) \propto k^n$ , sin que cambie significativamente el valor del exponente de escala.

En términos generales podemos interpretar este hecho a partir del concepto de decoherencia, el cual describe como un sistema cuántico evoluciona hacia un estado que se asemeja a un estado clásico descrito a partir de la interacción con su ambiente. Debido a que en este ambiente inflacionario una parte de la información del entrelazamiento de nuestro sistema de inflatones acoplados se pierde en él, tal como percibiría un observador situado en el radio de Hubble, la entropía del sistema crece. Recordemos que cuando la función de pureza  $\gamma$  de nuestro sistema de osciladores acoplados con  $N = 2, 3$  es máxima, correspondiente a un estado separable con  $\gamma = 1$ , tenemos que  $S = 0$ , mientras que si el sistema está máximamente entrelazado con  $\gamma = 0$  tenemos que la entropía  $S = 1$ . Así de esta manera, poder entender la decoherencia cosmológica de nuestros inflatones es importante, debido a que un estado decoherente perteneciente a una perturbación de un campo escalar inflacionario haría que se corriera el primer pico acústico y se redujera la amplitud del pico secundario en la radiación CMB<sup>xix</sup> [282].

Por otro lado, la época de recalentamiento (correspondiente a la etapa de después del descenso de la temperatura durante el período inflacionario por un factor de  $10^5$ ) es una etapa importante dentro de la cosmología inflacionaria. El recalentamiento conforma la etapa en que los inflatones decaen a partículas del modelo estándar (SM) y como consecuencia sin el fenómeno de recalentamiento el Universo estaría vacío de materia. Este recalentamiento ocurre a través del acoplamiento del campo inflacionario  $\phi$  con la materia del SM. Estos acoplamientos tienen que estar presentes como mínimo a través de interacciones gravitatorias, y particularmente en el caso que el inflatón sea un campo

---

<sup>xix</sup>Aunque por extensión no lo hemos podido abordar, el primer pico en las anisotropías de la CMB corrobora que el Universo es espacialmente plano, mientras que el segundo pico indica una cantidad substancial de bariones de materia oscura consistentes con las inferencias en nucleosíntesis [269].

escalar (tipo *singlet* con simetría de *gauge*) los acoplamientos más relevantes son

$$\frac{\lambda}{M}\phi(H\bar{q}_l)q_r, \quad \frac{\lambda}{M}F_{\mu\nu}^{\mu\nu}, \quad g^2\phi^2\bar{H}H \quad (4.133)$$

dónde  $M$  corresponde a la escala en que este acoplamiento es válido,  $\lambda, g, H$  es el campo de Higgs y  $\bar{q}_l, q_r$  son los fermiones del SM y  $F_{\mu\nu}$  es el tensor del campo e.m. estándar [283].

En el modelo más sencillo estos acoplamientos vienen determinados por el lagrangiano de interacción del modelo siguiente

$$\mathcal{L}_{int} \sim -\frac{1}{2}g^2\chi^2\phi^2, \quad (4.134)$$

donde  $\chi$  es otro campo escalar acoplado al campo escalar del inflatón, y que en los casos más realistas se considera que es el campo de Higgs del SM [283].

Como hemos visto anteriormente, la teoría cuántica para la producción de partículas  $\chi$  en el campo externo de fondo del inflatón empieza a partir de la expansión del campo cuántico  $\hat{\chi}$  a partir de operadores de creación y aniquilación tal que

$$\chi(t, \mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int dk^3 (\chi_k^*(t)\hat{a}_k e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}} + \chi_k(t)\hat{a}_k^\dagger e^{-i\mathbf{k}\mathbf{x}}). \quad (4.135)$$

Debido a que la ecuación del movimiento par  $\chi$  es lineal entonces se puede estudiar a partir de los modos de expansión en el espacio de Fourier. Esos modos cumplen que

$$\ddot{\chi}_k + (k^2 + m_\chi^2 + g^2\Phi^2 \sin^2(m_\phi t))\chi_k = 0 \quad (4.136)$$

, donde  $\Phi$  corresponde a la amplitud de oscilación del campo del inflatón  $\phi$ .

Esta última ecuación corresponde a una ecuación de Mathieu, la cual describe el fenómeno de oscilaciones paramétricas. Éste a la vez genera el fenómeno de resonancia paramétrica, relacionado con la perturbación y la oscilación a ciertas frecuencias asociadas con los armónicos de una función. Esta resonancia a la vez es el fenómeno asociado que existe detrás de la creación de partículas, y que para el lagrangiano 4.134 es el encargado

de generar las partículas del SM [283].

Ahora bien, ¿que pasaría si en vez del campo escalar del inflatón individual introdujéramos un campo escalar compuesto por un sistema de inflatones acoplados? Modificando  $\phi$  mediante una  $\phi'$  tendríamos una oscilación de amplitud  $\Phi'$  del campo perteneciente a dos inflatones acoplados con dos posibles amplitudes  $\Phi' = \Phi_1 \otimes \Phi_2$ . Éstas a la vez podrían generar a partir de la ecuación 4.136 tanto las partículas del SM como otras partículas fuera del SM. Finalmente, especulando hasta al final, éstas últimas podrían corresponder a partículas de materia oscura.

A partir de observaciones se conoce que el Universo actual contiene 4,6 % de átomos, un 23 % de materia oscura no relativista y no luminosa y el resto existe en forma de energía oscura. Aún así hace 13,7 billones de años esa proporción era de 37 % de átomos, fotones y neutrinos y un 63 % de materia oscura no relativista. Por lo tanto es necesario que el vacío inflacionario excitara esos bariones del SM y que creara la abundancia correcta de materia oscura. Aquí especulamos que quizás esos modos bariónicos se crearon a partir de uno de los modos de excitación y decaimiento en la época de recalentamiento a partir de un inflatón, mientras que el otro inflatón acoplado y entrelazado cuánticamente al primero, excitó los otros modos para la creación de materia oscura.

Es necesario declarar en este punto que los cálculos derivados anteriormente son, hablando estrictamente, “falsos”. Éstos en general ignoran muchos detalles importantes tales como: las perturbaciones del fondo espacio-temporal, la retropropagación de las perturbaciones en la geometría del espacio-tiempo, sutilezas alrededor de la elección del vacío, temas relacionados con las transformaciones de *gauge*, renormalización de los campos, etc. [272].

Por otro lado, existe una extensa diversidad de modelos inflacionarios, y aquí solo hemos desarrollado una aportación basándonos en el más simple de éstos. Esta aportación, como hemos ido viendo, nace de la analogía entre los sistemas clásicos mínimos capaces de exhibir estados quimera y los sistemas cuánticos con estados de entrelazamiento, enfocados éstos últimos a la descripción de la etapa inflacionaria cosmológica previa a la etapa

de recombinación, la cuál analizamos a partir del fenómeno de oscilaciones bariónicas acústicas.

Tal como escribe Kolb (irónicamente)[284], si uno examina detalladamente la literatura en cosmología inflacionaria observa a que existen todos éstos y más modelos:

“old, new, middle-aged, chaotic, quixotic, ergodic, exotic, heterotic, autoerotic, natural, supernatural, au natural, power-law, powerless, power-mad, one-field, two-field, home-field, modulus, modulo, moduli, self-reproducing, self-promoting, hybrid, low-bred, white-bread, first-order, second-order, new-world-order, pre-big-bang, no-big-bang, post-big-bang, D-term, F-term, winter-term, supersymmetric, superstring, superstitious, extended, hyper-extended, overextended, D-brane, p-brane, No-brain, dilaton, dilettante,...”

Así en este punto existen tres casos (más o menos equiprobables): que nuestro desarrollo ya esté estudiado en algunos de los modelos citados y/o que éste sea completamente erróneo.

## Capítulo 5

### Observaciones Finales

Como siempre me recuerda Pablo que dijo Borges: “los textos no se terminan, se abandonan”<sup>1</sup>. Con la intención de no dispersarnos divergentemente, para llegar a este punto abandonamos varias líneas de pensamiento en las posibles bifurcaciones que brotaron de esta tesis. A continuación itemizamos brevemente algunas de ellas capítulo a capítulo, acompañándolas primeramente de una reseña de éstos, a modo de conclusión.

#### *Hacia una Exploración de la Emergencia desde los Dominios Sonoros*

El carácter general de esta tesis se enfoca en estudiar, de manera exploratoria, como se pueden entender las propiedades, los patrones y las estructuras de ciertos fenómenos complejos desde un punto de vista sonoro, reorientando así la perspectiva visual más común en el estudio de éstos. Para ello en este primer capítulo se intentan asentar las bases conceptuales y teóricas para poder resituar esta transición de enfoques sensoperceptivos. Así, partiendo de una revisión de los conceptos de emergencia y auto-organización, éstos se buscan redefinir dentro de un marco sonoro. Seguidamente, después de analizar la

---

<sup>1</sup>Buscando la cita encontramos que probablemente corresponde a Paul Valery: “Un poème est jamais fini, seulement abandonné”.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

fenomenología de varios sistemas que manifiestan comportamientos complejos asociados a los dominios sonoros, exploramos varios tipos de medidas para poder cuantificar sus dinámicas temporales. Dentro de éstas resaltamos las series de tiempo y algunas de sus medidas asociadas, y los tratamientos de carácter entrópico, normalmente asociados a sistemas termodinámicos e informacionales. Así dentro de las series de tiempo nos centramos en el estudio específico de los ruidos  $1/f$  y analizamos su función de autocorrelación, encontrando que en éstos se maximiza. Dentro de los estudios entrópicos, enfocamos éstos dentro del campo de la termodinámica vibracional para comparar dos casos extremos, uno correspondiente a la entropía mínima fonónica y otro a la entropía mesoscópica. Este primer capítulo finaliza con la programación de dos sistemas musicales. El primero enfocado a aumentar la colección de ruidos correspondientes a procesos estocásticos, y el segundo a generar una multiplicidad de sonidos concurrentes a su complejidad mediante algoritmos de *machine learning*.

### *Apuntes Colindantes*

- La pregunta de investigación inicial, la cual cuestiona si “¿Se puede percibir y entender la emergencia y la auto-organización desde el punto de vista de la percepción auditiva y dentro del marco de los fenómenos sonoros?”, esconde varias sutilezas. Primero de todo podemos darnos cuenta que dicha pregunta contiene realmente cuatro preguntas producto de la permutación de los verbos (i) “percibir”, (ii) “entender”, con los sintagmas nominales (I) “percepción auditiva”, (II) “fenómenos sonoros”. Igualmente a estas cuatro preguntas se les tendría que sumar cuatro más, correspondientes a los sustantivos (1) “emergencia” y (2) “auto-organización”. Sin entrar en detalles acerca de cada una de las posibles preguntas que aquí residen, sólo mencionar la distinción de éstos conceptos dentro de una tradición filosófica de la ciencia de carácter empirista. En esta se enfatiza el papel de la experiencia y la evidencia, especialmente la percepción sensorial, en la formación de ideas y adquisición de conocimiento, sobre la noción de ideas innatas. Así cuestionando la tradición

sensoperceptiva de experimentar las propiedades de emergencia y auto-organización dentro de los marcos visuales esta pregunta se cuestiona colindantemente cuales serían las maneras para poder formarnos una idea y un conocimiento reestructurado de dichas propiedades dentro de un marco sonoro.

- Del conjunto de 67 figuras que forman este capítulo, gran parte de éstas corresponden a diversas tipologías de geometrías y gráficas, elementos al fin y al cabo de carácter visual. Este hecho resalta que la orientación de esta tesis no asume una dicotomía entre los reinos visuales y auditivos, ni tampoco una naturaleza binaria o exclusiva en y entre éstos. Más bien, la geometría perceptiva y imaginable se concatena con las morfologías de tiempo de manera entrelazada.
- Desde el lenguaje vibratorio de los elefantes y las ranas, pasando por las canciones y los llamados de los pájaros, los murciégalos y los insectos, hasta los aplausos, los terremotos, y los truenos; citamos ejemplos de posibles fenómenos emergentes asociados a los ámbitos sonoros. Algunos de estos ejemplos surgieron como respuesta en algunas pláticas de exposición de esta tesis en proceso en las que preguntó a los oyentes si podían pensar en algún caso afín donde eso sucediera. Estoy seguro que, en la multiplicidad de formas en las que se manifiesta la vida y en la infinitud de fenómenos que aún están por descubrir y entender, existen respuestas. La pregunta sigue abierta.
- De la variada gama de medidas formales para cuantificar la complejidad, en este capítulo nos hemos enfocado principalmente en medidas correspondientes a series de tiempo y a medidas entrópicas. Otra medida, la cual se utiliza ubicuamente tanto en sistemas dinámicos como en teoría de la información, es la información mutua. Esta medida, que se aplica partiendo de la complejidad de Kolmogorov a sistemas algorítmicos, podría ser útil dentro del contexto del ejemplo final del capítulo para el análisis de las salidas sonoras de nuestro sistema basado en *machine learning*. A rasgos generales esta medida se utiliza para conocer cual es la dependencia de dos

variables, o en el caso del sonido, mediante los métodos de análisis de componentes independientes (ICA), conocer que tan separable es un señal multivariante en sus componentes individuales. Esta posible separación de componentes se puede aplicar a la cuantificación de la complejidad en la multiplicidad de salidas sonoras MIDI de nuestro sistema algoritmo, en el que recordemos, la complejidad va aumentando interpoladamente en el tiempo.

- Finalmente de los dos sistemas sonoros programados al final del capítulo, en el primero, compuesto por una colección de ruidos que trata de aumentar una posible fonoteca de sonidos, recalcamos que existe una infinidad de procesos estocásticos sujetos a ser sonificados. Siguiendo la siguiente línea de razonamiento observamos que a cualquier función estocástica, compuesta de variables aleatorias, o más generalmente, a cualquier espacio de funciones generalizadas siendo tanto escalares como vectoriales, se les puede asociar una sonificación. De la misma manera, en el segundo ejemplo, el conjunto de mapeos escogido para la sonificación es uno entre muchos. En éste recordemos, se parte primero de una interpolación entre dos sonidos, los cuales escogemos en función de sus respectivos extremos de complejidad asociados como un sonido sinusoidal y un ruido  $1/f$ . En este punto se podría escoger realizar una interpolación por ejemplo de una función cuadrada, tipo delta de Kronecker (con la mismas complejidad inherente que la función sinusoidal), y en el otro extremo un ruido blanco, máximamente no correlacionado. Igualmente después, en el algoritmo de interpolación de partituras, podríamos seguir escogiendo por un lado, en el extremo de menos complejidad una misma nota repetida en el tiempo, mientras que en el otro extremo se podría tomar una partitura de notas que siguieran una función de ruido blanco. Así en esta interpolación obtendríamos finalmente una variación en el tiempo entre una cadena de notas completamente uniforme hasta llegar a una completamente no correlacionada. Igualmente que en los análisis realizados para el ejemplo, podríamos calcular el exponente de escala  $\beta$  final de la nueva secuencia

sonora.

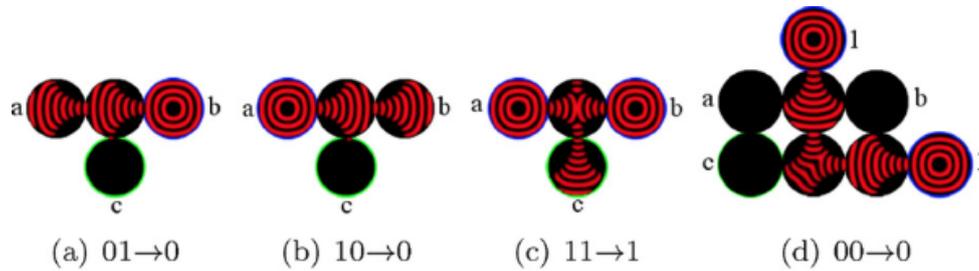
## *Diseño de Interacciones Sónicas en Sistemas de Bactocomputación*

La premisa vertebral de este capítulo surge de considerar, partiendo del capítulo anterior, como es posible utilizar experimentalmente las propiedades emergentes que observamos en ciertos fenómenos naturales para “ingenierizar” sistemas orientados a la creación de nuevos modelos, técnicas y dispositivos de representación sonora. Después de una revisión de los sistemas de computación convencionales y no convencionales y su aplicación al marco de las tecnologías musicales, partimos de un sistema de bactocomputación específico a los dominios de la biología sintética, analizando un sistema de quorum sincronizado en construcciones genéticas, el cual es capaz de sostener oscilaciones de fluorescencia propagándose en un dispositivo de microfluídica en el tiempo. Mediante diferentes técnicas basadas en la transposición de las señales lumínicas a sonido ideamos varios sistemas capaces de transducir dichas señales a sonido utilizando sistemas híbridos en los que las bacterias interactúan con elementos electrónicos del tipo VCO. Seguidamente, para ahondar en el entendimiento de la formación de frentes de sincronización en un sistemas de bacterias, proponemos un modelo espacialmente extendido de osciladores de van der Pol acoplados, el cual solucionamos analíticamente y numéricamente. Finalmente, a modo de conclusión, presentamos una instalación audio-visual alrededor de nuestro sistema compuesta por la visualización de las oscilaciones en el sistema de quorum sincronizado y de su respectiva sonificación.

### *Apuntes Colindantes*

- Dentro de la revisión del estado del arte no pudimos desarrollar a profundidad un paradigma de computación no convencional conocido como “computación basada en

colisiones” (*collision-based computing*), el cual podría resultar interesante aplicarlo a nuestro sistema de quorum sincronizado de relojes y dentro del ámbito de las tecnologías musicales. Este paradigma de computación no convencional se engloba dentro de la computación en sistemas de reacción - difusión (R-D) a través de la interacción de ondas de excitación y difusivas en reacciones químicas en dos dimensiones, tales como las reacciones de Belousov-Zhabotinsky. Así de esta manera una computadora basada en procesos de R-D, opera como un sistema espacialmente extendido que procesa información utilizando la interacción entre los patrones de crecimiento y las ondas excitables o difusivas. Mediante encapsulamientos de estas reacciones se puede construir el conjunto completo de compuertas lógicas a partir de colisiones de ondas (ver figura 5.2). En estos sistemas los valores informacionales (correspondientes a los valores de verdad de las variables lógicas) vienen dados tanto por la presencia o la ausencia de la localización de una onda. Así de la misma manera que se utilizan propagaciones de onda en sistemas R-D, se podría implementar un sistema encapsulado en trampas de microfluídica compuestas de nuestro sistema de quorum sincronizado. Dicho sistema se podría ensamblar tal que pudiera sostener colisiones entre diferentes trampas. Por otro lado, variando la concentración de AHL en cada una de éstas se podría controlar el parámetro de frecuencia de oscilación en éstas, de tal manera que finalmente se podrían implementar sumas y restas lógicas de ondas de fluorescencia análogas a compuertas lógicas.



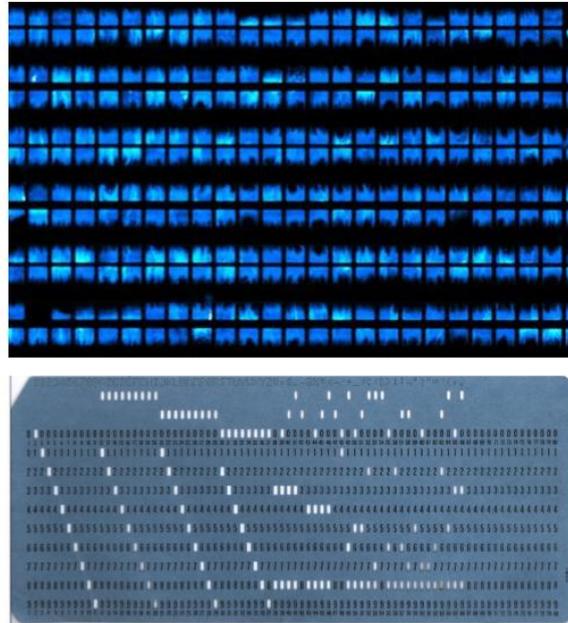
**Figura 5.1:** Diagrama de varias compuertas lógicas construidas a partir de encapsulados de reacciones de B-Z. De manera análoga a éstas se podrían construir dispositivos microfluídicos y realizar cómputos binarios o de *fuzzy logic* en construcciones genéticas oscilatorias.

- En esta capítulo se delinea en términos generales el prototipo de un sistema de síntesis sonora en sistemas híbridos bactoeléctricos, el cual en su parte bacteriana está compuesto de una construcción sintética capaz de generar oscilaciones. Por cuestiones de tiempo dicho prototipo no se pudo implementar físicamente y quizá resultaría interesante construirlo por ejemplo para validar y estudiar el modelo basado en osciladores de van der Pol. Tal vez la mayor limitante para construirlo podría ser la dificultad asociada al ensamblado de la construcción genética. No obstante la mayoría de éstas son modulares y se pueden armar a partir de BioBricks ya predeterminados. Por otro lado se podría pedir los plásmidos completos al grupo de Danino, Hasty o Mondragón. De la misma manera se podría pedir el molde del chip de microfluídica para construirlo posteriormente en el laboratorio. Igualmente sería interesante construir el esquema propuesto del plásmido sintético en electro-microbiología mediante *G. Sulfurreducens* y el sistema de *knockeo* y activado de los genes conductivos PilA dentro de un sistema de quorum sincronizado. Éste último, tal vez más novedoso, probablemente ya queda fuera de nuestro horizonte cercano de posibilidades.
- Con relación al modelo de osciladores de van der Pol modificados hay varios puntos a comentar. Primero de todo, des de la parte analítica sería interesante estudiar el

comportamiento de las dinámicas del sistema variando la topología de los acoplamientos  $a_{ij}$  y sus pesos. Esto se podría hacer quizá a partir de un enfoque mediante la función máster de estabilidad. En general, partiendo que tenemos un sistema del tipo  $\dot{x}_i = f(x_i) + \sigma \sum_{j=1}^N a_{ij}g(x_j)$  dónde  $\sigma$  corresponde a los pesos, podemos transformarlo a una ecuación del tipo  $\dot{y} = (Df + \gamma Dg)y$ , donde  $\gamma$  es el número complejo mapeado al mayor exponente de Lyapunov. Así el estado de sincronía de los osciladores acoplados se vuelve estable si la función  $\dot{y}$  es negativa. Igualmente se podría estudiar las dinámicas de interacción de las fases en vez de las frecuencias, y tal como comentábamos también se podrían realizar análisis a partir de la ecuación de Fokker-Planck perturbada. Por lo que respecta a la solución numérica mediante el método de diferencias finitas, resaltamos una aparente contradicción en la que cuando variamos la constante de acoplamiento  $\mu$  del sistema, nuestra solución en vez de variar en frecuencia aumenta o disminuye en amplitud. Esta cuestión se tendría que analizar más a fondo. Por otro lado al algoritmo del método numérico está incompleto. Por un lado se implementó una función de prueba (`test_sine()`) con un valor de tolerancia para corroborar la diferencia entre la solución numérica y la de prueba. No obstante faltó incluir un algoritmo para el análisis de estabilidad y convergencia de la solución numérica, a partir de criterios basados en tasas de convergencia.

- Con respecto a la instalación audiovisual “BioPixel Array”, ésta se podría volver a montar en un formato aumentado ya que de las 32 cajas originales se construyeron a día de hoy un total de 50. Una posible transformación de la instalación, bajo el mismo concepto inspirado en el estudio “A Sensing Array of Radically Couple Genetic BioPixels”, se podría construir en la analogía del dispositivo experimental de dicho estudio con las antiguas tarjetas perforadas de programación de computadoras. Esto permitiría hacer un mapeo tanto sonoro como visual, mediante leds, de diferentes instrucciones aplicadas a los conjuntos de trampas de microfluídica donde habitan

las bacterias.



**Figura 5.2:** Idea para la instalación “BioPixel Array” en analogía entre el sistema de biopixeles en bacterias y los sistemas de programación mediante targetas perforadas. La instalación recrearía una posible hibridación entre los primeros sistemas de computo clásicos y los nuevos paradigmas de bactocomputación.

## *Comunicaciones Vibracionales en Bacterias: Morfologías de Crecimiento y Transiciones de Morfotipo*

Este capítulo se centra en intentar dilucidar como el sonido y la vibración pueden llegar a ser fenómenos que condicionan y estructuran el surgimiento de ciertas propiedades emergentes de autoorganización de carácter espacio-temporal y funcional en colonias de bacterias *P. Dendritiformis*. Para ello se parte del estudio de la forma de dichas bacterias mediante el análisis de patrones de crecimiento difusivo en sistemas vivos en analogía a los mismos patrones en fenómenos abióticos. A partir de una revisión de estudios previos, replicamos experimentalmente las observaciones donde la selección de morfologías de

crecimiento de dichas bacterias viene determinada por los parámetros de nutrientes y de dureza del medio de cultivo. Específicamente dentro de estas morfologías nos centramos en el fenómeno de transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \leftrightarrow \mathcal{C}$ , en las cuales durante su crecimiento las bacterias experimentan un cambio a nivel fenotípico celular *micro*, observable a un nivel *macro* de colonia. Resituando los fundamentos comunicacionales en el estudio de microorganismos desde una aproximación a partir de señalamientos químicos hacia una basada en principios sonoros y vibratoriales, y fundamentándonos en experimentos previos, hipotetizamos que: **1** existe un señalamiento acústico y/o vibracional durante el crecimiento de las colonias de bacterias *P. Dendritiformis*, y **2** existe un señalamiento acústico y/o vibracional en la transición de morfotipo  $\mathcal{T} \rightarrow \mathcal{C}$  durante el crecimiento de las colonias de bacterias *P. Dendritiformis*. Mediante una metodología experimental enfocada al análisis de las emisiones acústicas mediante un sistema de microfonía de muy bajo ruido en una cámara anecoica, encontramos una señal de emisión acústica durante su crecimiento (validando la hipótesis **1**). Por otro lado no podemos correlacionar dicha emisión acústica con las transiciones de morfotipo (no pudiendo validar la hipótesis **2**). Seguidamente analizamos nuestros resultados experimentales, en comparación a la literatura, y proponemos un modelo mecánico para poder explicarlos. Éstos nos sirven para interpretar nuestras emisiones acústicas dentro de un marco comunicacional amplio, donde éstas pueden estar asociadas a la producción de energía y a procesos metabólicos celulares de carácter general. Finalmente presentamos el proyecto en desarrollo “Comunicaciones Especulativas”, el cual está compuesto de un sistema coevolutivo bacteria - inteligencia artificial, orientado a generar partituras audiovisuales en función de los patrones de crecimiento de las bacterias.

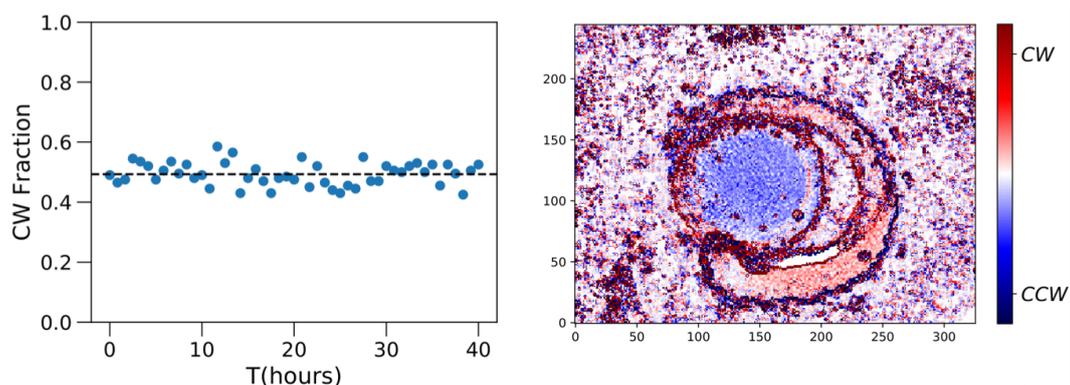
### *Apuntes Colindantes*

- La metodología que desarrollamos para realizar nuestros experimentos es mejorable en muchos aspectos. Primero de todo, aunque el fenómeno de transiciones de morfotipo  $\mathcal{T} \leftrightarrow \mathcal{C}$  no es muy estable, y por lo tanto es difícil saber que cultivos lo

van a exhibir, se tendría que investigar más alrededor de las condiciones de crecimiento para, primeramente afinar que concentraciones de nutrientes y de agar lo producen, y después ver que otras variables pueden afectar a su generación (tales como la temperatura, la luz, ph, etc.). Segundo, en nuestros experimentos no pudimos asesorar dichas transiciones más allá de la inspección visual del cultivo. Así en futuros experimentos sería conveniente poder cuantificar dichas transiciones de morfotipo mediante observaciones microscópicas desarrolladas a lo largo del experimento. Tercero, la metodología de medición acústica podría estar compuesta de otro tipos de sensores más precisos. Como comentamos en el capítulo, las técnicas de interferometría láser por efecto Doppler y los sensores tipo SAW, serían unos buenos candidatos para ejecutar medidas a mayor sensibilidad y precisión. Finalmente, aunque después de repasar la parte de análisis de datos estadísticos con la Dra. Ayari Fuentes todo parecía externamente correcto, se podría optar por otro tipo de la metodologías estadísticas para poder sacar más inferencias de nuestros resultados, así se podrían utilizar por ejemplo técnicas de *deep learning* para procesamiento digital de señales capaces de discriminar categorías señal - ruido (p.e. algoritmos del tipo *multiple feedforward*, convolucionales o recurrentes en redes neurales). Más allá de estas observaciones, como en todo experimento científico, un mayor tamaño de muestreo siempre ayuda a que la estadística que se deriva de los resultados que se obtienen se les pueda aplicar una estadística más significativa.

- A lo largo del proceso de aprendizaje en el cultivo y en el crecimiento de las bacterias *P. Dendritiformis*, pude probar, jugar y ensayar con otros experimentos colindantes. Cada uno de éstos abre la ventana a un panorama expansible y a la vez a una nueva línea de investigación en si mismos. En este punto mencionamos dos, los cuales ya empezaron a tomar forma y, de alguna manera, a caminar por si solos. El primero, en orden cronológico, parte de un estudio Ben-Jacob sobre los efectos de cooperación en cocultivos de bacterias bajo condiciones pervasivas con un medio de cultivo con

antibiótico. Partiendo, como en este capítulo, de la morfología excepcional de anillos que forma este cocultivo, se estudian las dinámicas funcionales de cooperación entre ámbos tipos de bacterias. En esta dirección hasta este punto se ha empezado a intentar reproducir dichos patrones con los mismos cocultivos que en el estudio: *P. Vortex* y *E. Coli*. Así el trabajo futuro está enfocado al registro de *time-lapse* en fluorescencia del cocultivo y a los experimentos con diferentes configuraciones de gradientes de antibióticos en éste. El segundo, parte del estudio en las mismas bacterias *P. Vortex* y su movilidad quiral. Mediante los algoritmos de *computer vision* expuestos en este capítulo, logramos determinar varias propiedades tales como sus contornos, direcciones, flujo óptico, etc. Mediante el uso de este tipo de algoritmos en *opencv2*, se empezó a investigar en el KeymerLab la posibilidad de medir la vorticidad, (ver figura 5.3). Éste tipo de medida y fenómeno, relevante en bacterias ya que en varios aspectos supone un parámetro fundamental en teorías alrededor del inicio de la vida, se podría estudiar en experimentos variando las condiciones externas ambientales de crecimiento.



**Figura 5.3:** Análisis realizados por Pablo del Keymer LAB, sobre la vorticidad en *P. Vortex*, medida como el rotacional del campo de velocidades. En estos estudios se observa como existe un equilibrio racémico quiral 50 – 50 en las bacterias a nivel individual (figura izquierda). En la figura de la derecha se observa que el núcleo del vórtex es *CCW* mientras que el brazo que se le desprende es mayormente *CW*. Ésta y otras observaciones merecen ser estudiadas en un futuro.

- Por otro lado referente al desarrollo, construcción y al uso de equipos DIY, en este

capítulo presentamos dos sistemas. Así colaboramos con Interspecifics en el microscopio de “Comunicaciones Especulativas”, y en su réplica en Chile el “OpenScope”, en colaboración con el Keymer Lab. En este último se trabajó en la implementación de un brazo robótico que mediante *servos* y comunicación con la imagen de *time-lapse* en RaspberryPi pudiera *trackear* automáticamente el borde de la colonia durante su crecimiento para poder obtener un vídeo de la expansión del frente de onda de la colonia de bacterias, o en su aspiración máxima un diagrama espacio-temporal de vídeos distribuidos en diferentes puntos de la colonia mientras ésta va creciendo. El segundo equipo que se ayudó a desarrollar fue el, informalmente, nombrado como *Baffle*. Este sistema en este punto parece operar funcionalmente, en lo que se refiere a la robustez en la toma de fotografías, iluminación y control de temperatura. No obstante aún falta por validar experimentalmente su operatividad en la modalidad de multifuorescencia. Esperemos que ambos equipos, abiertos en su proceso de construcción y disponibles para su uso dentro de la comunidad del CCG-UNAM, sigan desarrollándose, modificando, aumentando, y al fin, utilizándose.

- Por otro lado también esperamos que el proyecto “Comunicaciones Especulativas”, el cual ya hemos mencionado que forma parte de una investigación artística en proceso, siga desarrollándose. En este punto, en el que la i.a. ya es capaz de categorizar imágenes mediante *machine-learning*, se tendría que empezar a trabajar en las posibilidades y opciones de retroalimentación, quizá mediante estímulos químicos, de la máquina sobre las bacterias. Igualmente se tendría que analizar cual es la mejor manera de mantener al cultivo a lo largo de cierto tiempo de crecimiento. Sería bonito finalmente algún día poder observar cuales serían las dinámicas de crecimiento de las colonias de bacterias en este sistema coevolutivo bacteria - i.a.

## *Especulaciones Acústicas: Quimeras Mecánicas y Oscilaciones Bariónicas*

Este último capítulo de la tesis escala al anterior en un orden de descripción espacial, situándose primero en los dominios mesoscópicos con el estudio del fenómeno de estados quimera en un sistema mecánico de péndulos, y después otro orden de escala, en la investigación macroscópica en cosmología alrededor de las oscilaciones bariónicas acústicas, para finalmente retornar a la región de descripción mínima cerca de las escalas planckianas, mediante el estudio de modelos cuánticos en la época inflacionaria. Del estudio de los estados quimera en péndulos, proponemos una instalación sonora para percibir los estado quimera en un sistema de tres metrónomos análoga a la pieza “Poème Symphonique für 100 Metronome” de Ligeti. Finalmente desarrollamos programamos una interfaz audiovisual para el estudio de los patrones visuales y sonoros en un sistema de osciladores acoplados. Ya en la escala cosmológica, estudiamos el fenómeno de la anisotropía en la radiación CMB y su interpretación en términos de ondas sonoras de plasma bariónico y de fotones antes de la época de recombinación. En la última sección hibridamos los sistemas de estados quimera mecánicos y su descripción dentro de los dominios cuánticos con el estudio de los modelos inflacionarios cosmológicos. Para éstos especulamos alrededor de un sistema de osciladores cuánticos acoplados, para intentar describir el vacío en un campo de inflatones, sus posibilidades en referencia a las fluctuaciones cuánticas y al principio de indeterminación, y sus consecuencias en un modelo de decaimiento durante el período de recalentamiento en partículas de materia oscura y del SM.

### *Apuntes Colindantes*

- En la literatura existen tres estudios que utilizan tres sistemas de metrónomos para estudiar los estados quimera en sistemas mecánicos. El primero, cronológicamente, esta compuesto por dos balancines acoplados entre si con 15 metrónomos cada uno.

El segundo está compuesto de dos anillos concéntricos de metrónomos acoplados entre si a primeros vecinos en anillos alternos. El tercero y final es el correspondiente al sistema mínimo de tres metrónomos estudiado en el capítulo. Basándonos en éste último nos podemos preguntar cual sería el sistema mínimo de metrónomos, análogo al anterior, pero en tres dimensiones. El estudio de quimeras en tres dimensiones se ha estudiado teóricamente pero nunca de forma experimental. Así de esta manera proponemos un sistema experimental, para desarrollar en un futuro, compuesto de cuatro metrónomos en forma de tetraedro regular, separados por dos balancines acoplados entre si (con un balancín con tres metrónomos y el otro con uno). En el caso que esta disposición rompiera la simetría del sistema, proponemos estudiar el mismo sistema compuesto por cuatro metrónomos en cubo.

- Aunque por cuestiones asociadas a la contingencia no se pudieron conseguir los tres metrónomos, y los tres muelles (los monitores, los piezoeléctricos, los cables y la mezcladora ya están), la posibilidad de realizar la instalación sonora es factible y por lo tanto sigue en pie.
- Por cuestiones de extensión en la sección de las oscilaciones acústicas y en la de cosmología inflacionaria no pudimos indagar lo suficiente sobre unos datos particulares de la radiación CMB, obtenidos recientemente por el satélite Planck y conocidos como los modos B de polarización (*B-mode Polarization*). En el orden de las anisotropías de la CMB se puede observar que ésta está polarizada con dos modos distintos, el E y el B. Este último, extremadamente difícil de medir, está asociado al colapso de ondas gravitacionales primigenias durante la época de inflación. Si los análisis de la CMB que realizamos nos hablan de la época previa a la recombinación, en términos generales los análisis en esta radiación de los modos B, nos hablan gravitatoriamente de de la época oscura antes de la primera luz y durante la inflación. Sería interesante seguir aprendiendo e, indagando al respecto, seguir especulando a partir de otros modelos “juguete” cuantizaciones del campo inflacionario. De la mis-

ma manera también sería interesante seguir curioseando teóricamente en la analogía de los estados quimera de sincronía en los sistemas cuánticos.

## 5.1. *Conclusiones Finales*

Para dejar de fractalizarnos cada cuánto en cada cuanto, resumiendo el resumen en esta sección, podríamos determinar que esta tesis se sintetiza, tal como su título indica, en la: **“Exploración de Morfologías Temporales desde los Dominios Sonoros”**.

No obstante a modo de cierre buscaremos resolver un conjunto de palabras, dispuestas en forma de nudo y orientadas en un patrón reminiscente al de cadena, con las que, debido a esa compresión forzada, se puedan extraer de forma exegética algunas deducciones con las que llenarnos el bolsillo (de nuestra *chaqueta* mental).

Así de esta manera, mirando las migajas de letras esparcidas sobre el camino que hemos dejado atrás podemos preguntarnos, ya no cual ha sido esa “Exploración”, pregunta que se ha ido respondiendo a lo largo de este capítulo, sino más bien de que maneras podemos contestar de vuelta a las preguntas motivacionales que nos empujaron a emprenderla. Dichas preguntas, remontémonos, se postulaban de la siguiente manera:

**¿Se puede percibir y entender la emergencia y la auto-organización desde el punto de vista de la percepción auditiva y dentro del marco de los fenómenos sonoros?,**

**¿Es posible transponer y complementar las modalidades de extracción de información y significado de determinados fenómenos a través de una escucha de la naturaleza?.**

Ante este abismo aparente vamos a adoptar provisionalmente, de la misma manera en que se emplea un determinado mecanismo automático de respuesta ante cierta pregunta en la que se intuye un posible desbordamiento, una estrategia unitaria y absoluta: **SI**.

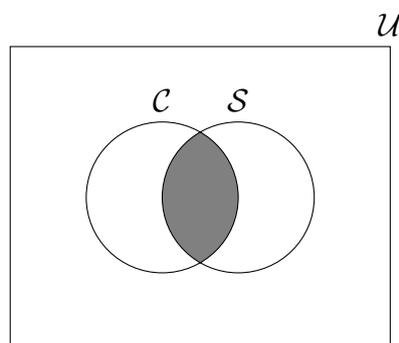
Conscientes de que esta mónada adverbial, que aunque nos quepa holgadamente en el bolsillo, no cumple con las expectativas conclusorias, intentaremos circundarla, discretamente segmento a segmento, con algunos matices.

Iniciemos pues y dejemos atrás este circunloquio inútil para aportar algo concreto al lector que ya se empiece a desesperar.

El lugar sistemático desde el que se lleva a cabo esta reinterpretación crítica sobre la complejidad, estructurada mediante la pregunta de investigación anterior que funge de columna vertebral a lo largo de la tesis, nos puede servir de criterio para juzgar la idea fundamental que la guía.

Así de esta manera la primera interpretación temática de los conceptos que categorizan un sistema complejo dentro de los dominios sonoros se delinea a partir de la reconstrucción de las definiciones de sus propiedades dentro del campo de estudio de los fenómenos sonoros. Ante esta redefinición y recolocación de ciertos conceptos, tales como los de estructura o de patrón, podemos primeramente cuestionarnos si es lícito el hacerlo.

Primero de todo, a partir de la teoría de conjuntos, podemos prefigurarnos un diagrama lógico en el que categorizar nuestro enfoque. Partimos así de dos conjuntos aparentes: el de los sistemas complejos  $\mathcal{C}$  y el de los fenómenos sonoros  $\mathcal{S}$ . El primer diagrama elemental que podemos imaginar, ver figura inferior, consiste en el subconjunto formado por la intersección  $\mathcal{C} \cap \mathcal{S}$ . De esta manera los elementos pertenecientes a la intersección de ambos conjuntos configurarían el universo exploratorio en el que se enmarca esta tesis  $\mathcal{U}$ .



Por otro lado, podemos ver que el conjunto de ejemplos citados en el capítulo 1 se

pueden entender, siguiendo la misma lógica de conjuntos, si pensamos en un subconjunto de fenómenos sonoros  $\mathcal{S}'$ , en el que se cumpla  $\mathcal{S}' \subseteq \mathcal{S} \mid \mathcal{S}' \subseteq \mathcal{C}$ . Paralelamente a esta definición podemos pensar también en un subconjunto  $\mathcal{C}'$  en el que se cumpla esta vez  $\mathcal{C}' \subseteq \mathcal{C} \mid \mathcal{C}' \subseteq \mathcal{S}$ . Así de esta manera tendríamos que se debería cumplir que  $\mathcal{S}' \Delta \mathcal{C}' = \emptyset \mid \mathcal{S}' \sim \mathcal{C}'$ .

Por lo tanto, partiendo de una definición dual tenemos que el subconjunto de sistemas complejos que forman parte de los fenómenos sonoros es equivalente al subconjunto de fenómenos sonoros que forman parte de los sistemas complejos, sólo y sólo si podemos adscribir propiedades sonoras a un subconjunto de sistemas complejos y si podemos adscribir propiedades complejas a un subconjunto de fenómenos sonoros.

En este punto, siendo conscientes de que este formalismo basado en la lógica del lenguaje no es quizá el más adecuado para describir la esencia de ambos sistemas y sus relaciones, y más teniendo en cuenta que tanto  $\mathcal{S}$  y  $\mathcal{C}$  son en principio conjuntos no finitos y por lo tanto  $\mathcal{S}'$  y  $\mathcal{C}'$  también pueden serlo, quizá resultaría más sensato abandonar esta línea de pensamiento. No obstante una cuestión que si consideramos relevante, y que apuntaremos a continuación, es justamente la posibilidad de la infinitud de ambos conjuntos.

Tal como escribimos en este capítulo, en concreto en la sección de comentarios referentes al Capítulo 1, el conjunto de ejemplos expuestos, el cual denotaremos de ahora en adelante como  $\mathcal{CS} \equiv \mathcal{C} \cap \mathcal{S}$ , es tan solo el subconjunto conocido de fenómenos sonoros en sistemas complejos perteneciente al conjunto  $\mathcal{CS}'$  de fenómenos aún por descubrir tal que  $\mathcal{CS} \subseteq \mathcal{CS}'$ .

Así recapitulando podemos considerar que la contribución fundamental de esta tesis puede ser, por un lado la formalización explícita de la existencia de una categoría definida por  $\mathcal{CS}'$ , y por otro lado el análisis de un subconjunto de ejemplos  $\mathcal{CS}$ , en los Capítulos 2, 3 y 4, a partir de las premisas construidas a lo largo del Capítulo 1.

Reescribiéndolo de otra manera, a partir de la creación de un formalismo que nos sirve de anclaje y que concreta y acota como podemos describir un conjunto de fenómenos que

exhiben propiedades emergentes dentro de los dominios sonoros, y que a la vez propone un conjunto de herramientas formales para su análisis, encontramos un conjunto de sistemas experimentales en los que observamos que dichas propiedades se manifiestan de maneras novedosas y en distintas escalas espacio-temporales.

Sin embargo una cuestión esencial en este punto es poder contestar de alguna manera a que nos referimos con la frase “de maneras novedosas”. A continuación lo tratamos de explicitar resumidamente:

- **Capítulo 1:** El formalismo matemático asociado a las series de tiempo, el cual se introdujo para buscar maneras de cuantificar el grado de complejidad asociado a determinados procesos mediante medidas de correlaciones y mediante el contenido informacional y termodinámico en ciertos sistemas, nos llevó a la creación de sonidos con propiedades sonoras nuevas. Por un lado, mediante herramientas de síntesis DSP creamos representaciones de ruidos tales como el Fractional Gaussian Noise o el Multi Fractional Gaussian Noise y a la vez de un conjunto diverso de procesos estocásticos, los cuales no existían anteriormente en su modalidad sonora. Por otro lado también creamos un sistema de síntesis sonora, capaz de generar un conjunto sonoro autogenerativo concurrente a su complejidad a partir de sistemas de interpolación basados en algoritmos de *machine learning*.
- **Capítulo 2:** El estudio de las propiedades oscilatorias en sistemas biológicos nos llevó a la creación de un sistema novedoso de síntesis sonora mediante el uso híbrido de sistemas bacteoelectrónicos. Así de esta manera el sistema de *Voltage Controlled BactoOscillator*, más allá de servir como un modelo prototipo, su simulación mediante técnicas DSP y de síntesis análoga en VST's nos sirvió para proponer nuevos dispositivos y técnicas de síntesis sonora. En la misma línea, la propuesta novedosa con respecto a la construcción de un sistema oscilatorio genético basado en el uso de bacterias con propiedades electrónicas y su integración en sistemas de electromicrobiología hibridizados con dispositivos sonoros puede inspirar a la crea-

ción de nuevas interfaces y sistemas enfocados a la creación de nuevos diseños de interacciones sónicas.

- **Capítulo 3:** Siendo la búsqueda de señalizaciones sonoras y acústicas durante el crecimiento de colonias de bacterias un campo de estudio experimental que ha recibido tradicionalmente poca atención dentro de la investigación en microbiología, enfatizamos su relevancia dentro de dichos contextos en términos de su funcionalidad biológica. Más allá de este hecho desarrollamos un sistema experimental para el cual encontramos emisiones acústicas para un sistema de bacterias que previamente no se había estudiado desde esta perspectiva sonora. Igualmente para el análisis de la señales obtenidas proponemos el uso de determinados modelos físicos dentro del campo de la acústica y los contrastamos de manera singular con los resultados previos de los campos tanto de la bioacústica como de los sistemas reológicos.
- **Capítulo 4:** La transposición del fenómeno de quimeras mecánicas en sistemas de metrónomos acoplados hacia los dominios perceptibles del sonido constituye una manera novedosa de acercarse a dicho fenómeno, en el que sus propiedades de sincronía y asincronía que cohabitan en el sistema determinan finalmente un sistema experimental acústico nuevo. Por otro lado, el estudio de las BAO dentro del contexto de los sistemas acústicos, aunque no sea estrictamente original, nos sirve para resaltar como el sonido es a la vez un fenómeno que condiciona ciertas propiedades en la generación de estructuras dentro de las escalas cosmológicas y como una fuente de inspiración para empezar a trazar analogías alrededor del estudio de los fenómenos cuánticos asociados a las épocas inflacionarias del Universo.

Este compendio que acabamos de realizar, muy resumidamente y dejando intencionalmente atrás ciertos detalles a favor de una visión sumaria, nos induce a suponer que los conceptos de emergencia y auto-organización son, de forma global, enunciables a partir de un lenguaje sonoro mediante una tipología de ejercicios teóricos y experimentales en los que se reacomodan y se toman prestados los conceptos de estructura y patrón adscritos

y asociados comúnmente al campo de estudio de los sistemas complejos.

De esta manera quizás la contribución más relevante de esta tesis haya sido, visto en perspectiva, el haber utilizado a nuestro favor el sesgo cognitivo sonoro para explorar ciertos fenómenos que *a priori* no eran descriptibles en estos términos y dentro de estos ámbitos, para enmarcarlos así en lo que se podría humildemente conceptualizar como una nueva categoría temporalmente autónoma del conocimiento, acotada en el conjunto de fenómenos sonoros que muestran propiedades de emergencia y auto-organización.

Este sesgo cognitivo sonoro, que de alguna manera quedaba explicitado en la pregunta de investigación inicial en la que se exhortaba hacia “una escucha de la naturaleza”, creemos finalmente que conforma un entrenamiento epistemológico, más que válido: necesario, para adentrarnos a una nueva exploración de los alcances, posibilidades y fundamentos de los fenómenos naturales, ya no sólo desde los ámbitos científicos sino también desde los ámbitos artísticos, oscilando respectivamente entre las metodologías objetivas encarnadas en los actos de consenso grupal y las subjetivas concomitantes a las acciones en las que impera la sensibilidad individual.

En esta misma dirección y en este punto, en el que sentimos que de alguna manera ya ha quedado explícito que esta “escucha de la naturaleza” no se limita tan sólo al estudio antropocéntrico dentro los rangos perceptibles delimitados por nuestra tipología particular de sistema de escucha y por sus mecanismos neuronales asociados al córtex auditivo, hemos intentado mostrar a lo largo de la tesis que la belleza que se desprende del estudio de los fenómenos sonoros reside en que éstos habitan entrelazadamente y se propagan desde la escalas cuánticas hasta las cosmológicas e inflacionarias.

En este contexto también hemos visto que el ejercicio de parar nuestra nuestra oreja, de manera real (experimental) y teórica (metafórica), hacia los paisajes sonoros circundantes biofónicos, geofónicos y antropofónicos, se puede expandir hacia otros posibles ambientes singulares mediante una escucha, ya no de lo exclusivamente asociado a nuestra audición, sino a partir del arrastre de cualquier fenómeno perceptible e imaginable que de alguna manera pueda considerarse inherentemente vibratorio hacia nuestro círculo panorámico

de atención.

Ahora bien, ante este enfoque al que nos adscribimos es conveniente cuestionar ad hoc cómo se puede justificar dentro del contexto de una tesis que pertenece (oficialmente) al campo de investigación de las tecnologías musicales. Partamos por quórum de la definición genérica de wikipedia:

La tecnología musical es un campo de conocimientos que se enfoca en el uso de cualquier dispositivo, mecanismo, máquina o herramienta física o en software por parte de un artista para hacer o interpretar música, para componer, anotar, reproducir o grabar obras musicales, para analizar o editar música o para crear/reproducir fuentes sonoras alternativas.

Visto en perspectiva podemos considerar genéricamente que en esta tesis: uno, si se utilizan “dispositivos, mecanismos, máquinas y herramientas físicas y de software”; dos, no quizá exclusivamente por parte de “un artista” sino, como nos definíamos en los inicios de la tesis, por parte de “un científico, artista, o explorador híbrido de la ya no-disciplina”<sup>11</sup>; tres, si se “hace, interpreta, compone, anota, reproduce, graba, analiza y edita” tanto “música” como “fuentes sonoras alternativas”.

Finalmente para acabar de zanjar esta justificación, en el caso que se requieran de otros argumentos a favor de la adecuación de su contenido dentro del marco de la tecnología musical, podemos precisamente analizar etimológicamente estas últimas palabras. Así consideramos que esta tesis aborda “el arte/oficio del estudio/tratado de la música” por un lado y por otro “el arte/oficio del estudio/tratado de fuentes sonoras alternativas”, tomando en cuenta la definición anterior. Ahora bien, para definir a los elementos asociados al conjunto de “fuentes sonoras alternativas” retornamos de nuevo a nuestro enfoque inicial para responder que según nuestro parecer estas se configuran, más allá de cualquier

---

<sup>11</sup>Aunque ahora visto a distancia, después de percibir la confrontación que genera estos tipos de aproximaciones, preferimos más bien radicalizarnos de una y adscribirnos, si es que las etiquetas sirven de algo, a la “anti-disciplina”. Así de esta manera, cuando se pregunte en términos generales de que va esta tesis, poder responder por ejemplo: - esta tesis es una investigación anti-disciplinaria sobre el estudio de...-.

fenómeno directamente o indirectamente sonoro, como “cualquier fenómeno perceptible e imaginable que de alguna manera pueda considerarse inherentemente vibratorio”.

Siendo conscientes de que valiéndonos de esta última definición escapamos de la lógica natural en la que el sonido se entiende exclusivamente a partir de los factores en conjunto asociados a la vibración de: (i) el objeto fuente, (ii) las moléculas de aire o otro medio, (iii) el tímpano o otro tipo de sensor perceptivo análogo, podemos resaltar que en distintos lugares de la tesis a veces este enfoque se cumple en su completitud (i)+(ii)+(iii), mientras que en otras se manifiesta parcialmente (i)+(ii) o bien tan sólo (i).

Uno de estos últimos casos en los que dentro de la investigación se eliminó parcialmente el rol ontológico del oyente fue durante el estudio de las oscilaciones bariónicas acústicas, en las que la fuente vibratoria de plasma bariónico oscila en un medio constituido por el Universo previo a la recombinación. Colindantemente el estudio de este fenómeno, a partir del quehacer “exploratorio” que titula esta tesis, nos condujo a la necesidad de entender la génesis vibratoria del Universo durante la época inflacionaria. En este contexto el concepto de medio material en el que sucede la vibración empieza a perder su coherencia formal dentro de los ámbitos sonoros debido principalmente a que la vibración, cuántica en estos casos, sucede en un vacío, o más concretamente en un campo escalar.

Ahora bien, y como siempre por puro placer intelectual y para reforzar de alguna manera esta visión a la que nos adscribimos y en la que nos desplazamos de punto a punto por las escalas espacio-temporales del conocimiento siguiendo subjetivamente los *links* en los que se manifiesta la vibración, podemos desplazarnos temporalmente en sentido opuesto a los orígenes y preguntarnos, de forma similar y a modo de desenlace y para no coagularnos en la mera justificación que ha devenido esta sección de Conclusiones Finales, cual sería el final de esa vibración dentro de un contexto cosmológico.

Para ello, rodeando con cada brazo las ideas vitalistas y las emergentistas que de alguna manera nos han ido acompañando implícitamente a lo largo de esta tesis, emprendemos un último viaje, sin expectativas, tal y como debería ser en cualquier viaje final, y tratando de asentar un enfoque filosófico que podríamos denominar *de novo* como *panvibracionista*,

nos encaminamos hacia la exploración de la idea de la muerte térmica del Universo para divagar sobre la esencia de la última vibración.



**Figura 5.4:** Dios el Geómetra representa el acto de creación del mundo (Francia, siglo XIII). Según la traducción del copto sahídico al español, el primer versículo del Evangelio de Juan dice: “En el principio existía el Verbo y el Verbo existía con el Dios y Dios era el Verbo”. El Verbo, que a la vez es una traducción de la palabra griega «Lógos», puede significar pensamiento y habla, es decir, razón, proporción o lógica, entre otras cosas. En nuestra interpretación herética adulterada con ciencia, lo podemos entender a conveniencia como el sonido. Este sonido en los escenarios inflacionarios correspondería a la perturbación del vacío mediante los campos escalares cuánticos. A partir de ahí y llegando a la época de la recombinación citamos el tercer versículo bíblico del libro del Génesis: “Y Dios dijo: Sea la luz; y la luz fue”. Así podemos interpretar, *sui generis*, que el sonido engendró (dio a luz, nunca mejor dicho) al fotón. Ahora bien, cuando el Universo deje de ser un universo observable y se vuelva oscuro, podemos preguntarnos si el sonido aún persistirá de la misma manera en que éste ya existía antes de que el Universo fuera visible.

La muerte térmica, también llamada muerte entrópica, corresponde a uno de los posibles escenarios cosmológicos en los que se describe a los estados finales del Universo. En éstos se conjetura que ya no existirá ningún tipo de energía libre para crear y mantener

los procesos que tradicionalmente se han ido desencadenando en el Universo. Visto en términos de la segunda ley de la termodinámica, considerando el Universo como un sistema aislado en el que la entropía tiende a aumentar, éste alcanzará en algún punto su estado de máxima entropía, i.e. un estado de equilibrio termodinámico en el que el Universo en su completitud tendrá una temperatura constante en todos sus puntos del espacio y en el que por lo tanto ninguna máquina térmica podría operar; lo que a la vez es equivalente a decir que éste no podrá albergar vida y, de manera más drástica, ningún tipo de proceso y por ende ningún tipo de sonido.

No obstante, en *stricto sensu*, resulta inadecuado poder hablar de una entropía asociada al Universo<sup>III</sup>, en el cual lo que se observa esencialmente es su desequilibrio, cuando esta medida sólo se puede definir formalmente para sistemas en equilibrio. Igualmente y en la misma dirección, dentro del marco observacional de la cosmología moderna, la temperatura del Universo está continuamente cambiando, de la misma manera en que también el Universo se expande continuamente.

Así dentro de este contexto es difícil pensar en un escenario para el cual se llegara a un equilibrio termodinámico real y en el que por lo tanto se alcanzara una temperatura constante. Sin embargo dicha expansión podría en principio ejecutarse de manera adiabática, i.e sin transferencia de calor con el entorno, de tal manera que la entropía para un determinado volumen del Universo (comóvil) pudiera alcanzar un valor constante. En este caso el Universo evolucionaría de la misma manera hacia un estado sin la capacidad de sostener vida y sin ninguna posibilidad de realizar cualquier tipo de trabajo físico. A este último escenario, en contraposición al de la muerte térmica “clásica” se le denomina comúnmente como muerte térmica cosmológica.

Ahora bien, previamente a que se llegue a esta presunta, y para algunos aterradora, muerte térmica existe todo un cronograma de hechos que se supone que se irán desencadenando, los cuales vamos a exponer brevemente en una línea de tiempo, la cual describi-

---

<sup>III</sup>Tal como señalaba Planck: “Hablar de -Entropía del Universo-, no tiene significado porque no admite ninguna definición precisa”.

remos, debido a su gran rango de expansión, en una doble escala logarítmica ( $100^* \log \log$  años).

Partiendo de la época de la recombinación, dónde la radiación cósmica de fondo empieza a discurrir libremente en el Universo en las escalas de los millones de años (recordemos que los primeros fotones se liberan a los 380,000 años), nos situamos en nuestro punto de partida del Universo actual en las escalas de los billones de años (recordemos que estamos en los 13,8 billones de años posteriores al Big Bang). Así en las escalas del futuro que se comprenden de los trillones a los cuatrillones de años (de 110 a 120 en la doble escala logarítmica), las estrellas en el Universo van a dejar de fusionarse y su creación va a cesar. Justo alrededor de los 120 años nuestro Sol se habrá convertido en una enana negra (una enana blanca que ya no emite calor ni luz), alrededor de los 130 todos los sistemas solares habrán desaparecido y alrededor de los 140 años lo habrán hecho todas las galaxias. Esta era que se conoce como Era Degenerada, se finalizará alrededor de los 160 años, cuando todos los protones que formaban el Universo hayan decaído y así toda la materia que constituía la vida y las estrellas habrá desaparecido. A partir de aquí se llega a la Época de los Agujeros Negros, en la cual a su inicio los agujeros negros del orden de una masa solar se evaporarán, para finalizar en el momento en que también lo harán los agujeros negros del orden de 10 billones de masas solares a los 200 años (correspondientes aproximadamente a  $10^{100}$  años en la escala lineal). A partir de aquí ya se entrará finalmente a la época conocida como Época Oscura, después de que los agujeros negros se hayan evaporado emitiendo la última luz y supuestamente los últimos gravitones, el Universo quedará vacío. Los fotones, neutrinos, electrones y positrones remanentes se propagarán de punto a punto sin poder interactuar entre ellos y gravitacionalmente hablando en este punto el Universo estará dominado por materia oscura, electrones y positrones.

Habiendo recorrido así de esta manera el futuro de nuestro Universo podemos ver ahora que ya en la Época Degenerada, en la que toda la materia que constituía las estrellas y galaxias ha desaparecido, tampoco existirá ningún proceso al cual se le pueda adscribir una fenomenología sonora. Al contrario de la época previa a la recombinación, donde el

plasma de fluido bariónico podía sostener oscilaciones acústicas, en este punto en el que tampoco hay luz, o más bien en el que la luz que hay se ha corrido enormemente hacia el rojo a longitudes de onda gigantes y de las que se supone que tienden asintóticamente al infinito, aquí ningún tipo de materia sería capaz de oscilar en el medio absolutamente enrarecido del Universo. Por lo tanto concluimos que el sonido, que ya existía antes de la luz en forma de oscilaciones acústicas no sobrevivirá y no sobrepasará definitivamente a ésta.

No obstante a pesar de que ya no exista ni sonido ni la luz (ni tampoco el tejido del espacio-tiempo al menos como lo entendemos ahora) es probable y lógico pensar que siga existiendo alguna suerte de vibración cuántica remanente y que ésta vaya a jugar un rol determinante en el final de finales del Universo, el que se especula que puede acontecer mediante una singularidad conocida como el Big Rip, una gran rasgadura.

En general la constante cosmológica que ha ido expandiendo el Universo y que se supone que es similar en cada momento del tiempo (recordemos la ley de Hubble anunciada en el Capítulo 4, en la que su carácter exponencial determina la expansión de un volumen local correspondiente al mismo número de veces sobre el mismo intervalo de tiempo) caracteriza al Universo con una constante de Hubble pequeña y estable. Sin embargo en los escenarios del Big Rip se postula que la constante de Hubble se incrementa hasta el infinito en un rango de tiempo finito debido a un incremento de la energía oscura, la cual opera desgarrando el tejido del espacio-tiempo superando paralelamente a todas las fuerzas fundamentales que mantienen unido al Universo y haciendo que todas las distancias en éste diverjan hacia valores infinitos.

Para cerrar esta con conclusión en el panorama de la desolación<sup>IV</sup>, y sin esperar que en este punto cobre algún sentido aparente dentro del contexto de esta tesis, fantasearemos con la idea de una sinfonía cósmica final, o mejor dicho de una monofonía, compuesta musicalmente hablando por el mismo *élan vital*, geómetra de los espacios y los tiempos

---

<sup>IV</sup>“[...] This is the way the world ends. This is the way the world ends. This is the way the world ends. Not with a bang but with a whimper.” Extracto final del poema *The Hollow Men* de T.S. Elliot.

que nos ha ido acompañando, y ejecutada por el instrumentista sobreviviente del último campo escalar con la capacidad esencial de vibrar.

No obstante más allá de disponernos a especular sobre sus matices sonoros, viémoslo tantito hacia otro enfoque e imaginemos más bien la posibilidad (en cierto sentido factible desde una perspectiva de dialéctica histórica) de un cambio de paradigma científico *à la* Kuhn (sugestionado tal vez por la sensibilidad delirante de un, o mejor aún, de un colectivo (multiespecie quizás) de estetas de la anti-disciplina), que nos otorgara una tecnología teórica, si cabe más bella y acertada que la del tótem del oscilador armónico para poderla, si aún cobra sentido este verbo, comprender en su soledad.



**Figura 5.5:** Incurrir en el recuento de los mitos, como hicimos en la figura anterior, y más allá de lo anecdótico que pueda suponer dentro de esta tesis el ejercicio de hibridarlos junto a contextos de carácter científico, sólo adquiere un sentido, y es de cierta manera honesto, si se engloba en una visión comparativa dispuesta con el fin de sensibilizarnos ante lo nouménico en estos escenarios cosmológicos. Por ello incluimos a modo de sugestión como última figura, representativa de la cosmogonía mesoamericana, una imagen del *Códice Borgia*, la cual muestra una representación del dios creador Tezcatlipoca del cual brota de su boca una flor (*Xochitl*), asociada ésta a la palabra, al canto y a la música.

Regresando de esta dispersión en la que nos hemos imbuido, y para ir cerrando esta

conclusión, volvamos tan sólo por un momento a contextualizar esta tesis dentro de los ámbitos de la teoría del conocimiento. Más allá de cuantificar en que medida el campo académico de la tecnología musical, en su contexto global, está condicionado por una industria musical, creemos que no erramos mucho al decir que su esencia histórica se ha ido conformando en base a una aproximación epistémica más bien de carácter reduccionista. Sin ejemplificarlo específicamente en este punto, vemos que esta tendencia a la vez se vuelve especular en otras ramas del conocimiento y de la ciencia. Aunque obviamente reconocemos el mérito y la importancia de este enfoque, en esta tesis hemos tratado acentuar y de construir, modestamente, lo que se puede asemejar a una “teoría general”.

Por otro lado, en el fluir de las ciencias se observa invariablemente esta oscilación cíclica entre periodos de empiricismo y de teoría, de reduccionismo y de holismo. A la vez sucede que los avances empíricos se suelen sintetizar mediante las contribuciones teóricas, las cuales se configuran a partir de enfoques basados en principios básicos y modelos “juguete”, dispuestos a ofrecer esas visiones de carácter general con las que, algunos, nos enamoramos irremediabilmente. De la misma manera sucede que las investigaciones reduccionistas en las que se exploran y finalmente se descubren esos componentes y procesos, por ejemplo en los niveles microscópicos, cargan de sentido y significado a los estudios holísticos en los que se muestra como estos fenómenos contribuyen las estructuras (como ya bien sabemos ahora: espaciales y temporales) y a la funcionalidad de los sistemas complejos descritos en un nivel jerárquico de organización superior. Ahora si que *de gustibus non est disputandum*, los estudios teóricos y los empíricos, reduccionistas y holísticos, normalmente se suelen llevar a cabo por personas diferentes, motivados por diferentes preguntas y predilecciones y ambos son, no hace falta decirlo, igual de válidos y necesarios.

Finalmente para dejar de darle vueltas al malacate, tan sólo decir que agradecería, rescatando el primer pronombre personal que se ha eliminado a lo largo de la redacción de esta tesis para su buen devenir académico, que si a algún lector le resuena cualquiera de los múltiples de los puntos aquí expuestos, cualquiera, tuviera la confianza de aproximarse

a mí, y que con un café compartido, o con otra sustancia psicoactiva de su preferencia, pudiéramos dedicar un tiempo a debrayar al respecto. Y si no es así *non c'è tanto problema*, “mi voz no escuchada, o apenas escuchada, ha de sonar aún cuando yo muera, sola, como el viento en los juncos sobre el agua”, sola como la última y la primera vibración en el vacío .

He dicho.



### *Respuesta a Preguntas de los Tutores Sinodales*

*¿Qué aporta el dominio sonoro a la comprensión de los fenómenos emergentes y de autoorganización presentado en la tesis y en general a la comprensión de los sistemas complejos?*

Los sistemas complejos, en su definición más general, se pueden definir como sistemas compuestos por varios componentes los cuales interactúan entre sí. Algunas de sus propiedades, tales como la emergencia y la autoorganización, surgen de dichas interacciones y de alguna manera se manifiestan mediante la aparición de un comportamiento colectivo no planificado y que es difícil de predecir a partir de las entidades más pequeñas que conforman dicho sistema. La sensación de dicho comportamiento colectivo organizado generada en un determinado observador (entendido como cualquier ente capaz de realizar mediciones de magnitudes físicas de un sistema complejo para obtener información sobre el estado físico de dicho sistema) forma parte de un proceso a partir del cual sus sistemas sensoriales responden a un estímulo y proveen datos para dicha percepción.

En el caso de que el estímulo sea de naturaleza lumínica dicha sensación de organización y orden se experimenta mediante una modalidad sensorial asociada a la percepción visual y se procesa cognitivamente a partir de los conceptos asociados de propiedad, estructura y patrón espacial. No obstante si asumimos que dicho sistema físico complejo es capaz de manifestarse mediante otra clase de estímulos, sonoros en el caso que pertoca a esta tesis, tenemos que el proceso de integración sensorial viene condicionado por una percepción asociada al sistema auditivo. Debido a que la transducción y el procesamiento de información es diferente entre ambos sistemas perceptivos, en esta tesis se explora cómo la sensación de un comportamiento colectivo que manifiesta un determinado sistema complejo se puede entender bajo los conceptos de propiedades, estructuras y patrones ya no solamente desde los ámbitos espaciales sino sonoros y temporales.

De esta manera en esta tesis se buscan herramientas, tanto desde los ámbitos teóricos como experimentales, para reconfigurar y transformar dichos conceptos hacia las moda-

lidades sonoras con la finalidad de aumentar la comprensión y el entendimiento de los sistemas complejos a partir de una aproximación multimodal de la percepción.

Así de esta manera uniendo e integrando el nuevo conocimiento que se desprende de esta tesis desde los ámbitos sonoros y temporales junto a los visuales y espaciales aportamos un conjunto de ejemplos y metodologías para el estudio de la emergencia y la autoorganización desde una epistemología tanto empírica como estética más global que tiene en cuenta la diversidad de estímulos físicos y de modos de percepción y que sirve para generar un nuevo punto de vista a partir de la cual estudiar y entender los sistemas complejos de manera más universal.

*Una interpretación y discusión general que engloba todos los resultados parciales y regresar a la pregunta de investigación original para concluir si al final el análisis desde esta nueva perspectiva de lo sonoro haya contribuido algo para entender mejor los sistemas complejos y el fenómeno de la emergencia.*

La estrategia de investigación adoptada a lo largo de esta tesis se conforma a partir de la conjunción modular e interconectada de diferentes ramas del conocimiento con la finalidad de proponer una visión de carácter holístico que nos permita generar un conocimiento más general de los sistemas complejos y de las propiedades que se manifiestan desde los ámbitos sonoros. Por otro lado la metodología global de esta tesis funciona en dos direcciones opuestas. Por un lado se asientan las bases teóricas y conceptuales para un análisis de las propiedades de emergencia desde el punto de vista de un oyente y para permitir que este pueda examinar y estudiar dichos sistemas desde los dominios teóricos en el capítulo 1, y experimentales en los capítulos subsiguientes. Por otro lado, a lo largo de la tesis las diferentes herramientas matemáticas y de cómputo nos permiten a la vez generar dichas señales sonoras a partir de diferentes sistemas físicos.

Así en el primer capítulo, a partir del estudio de las series de tiempo, hemos creado un sistema sonoro generativo de ruidos concurrentes a su complejidad mediante algoritmos de aprendizaje máquina, y en el capítulo 2 un sistema sonoro mediante dispositivos bacteoelectrónico mediante sistemas de cómputo no convencional que utilizan las propiedades

oscilatorias de un sistema de bacterias y las transforma a sonido. Igualmente en el capítulo 4, hemos propuesta la creación de un sistema mecánico de metrónomos acoplados dispuesto a generar señales sonoras de sincronía complejas.

Por otro lado y desde una perspectiva de análisis en el capítulo 3, hemos explorado como el sonido y la vibración condicionan y estructuran el surgimiento de ciertas propiedades de autoorganización en colonias de bacterias, y en el capítulo 4 analizando los fenómenos de CMB hemos visto como la autorganización de estructuras en el cosmos se puede entender a partir de fenómenos inicialmente sonoros.

Por lo tanto, el haber adscrito y asociado una perspectiva sonora a un conjunto de fenómenos complejos teóricos y experimentales nos ha servido tanto para analizar y entender de que maneras se puede percibir la complejidad y a la vez de que formas se pueden crear sistemas experimentales que exhiban propiedades complejas a partir del sonido.

Ahora bien, una pregunta que aún nos queda por responder es como en nuestros sistemas experimentales estudiados a lo largo de la tesis, la emergencia y la autorganización que se manifiesta desde los dominios temporales y sonoros se entrelaza con una manifestación y percepción desde los dominios espaciales y visuales, y viceversa.

En el capítulo 2 los patrones emergentes del sistema de quorum sincronizado de relojes genéticos se evidencian inicialmente como una estructuración tanto espacial como temporal, en la que la variación de las señales de fluorescencia de los reporteros bacterianos se percibe visualmente como un patrón oscilante de pulsaciones en el espacio. De esta manera nuestro trabajo en este apartado se enfoca en aprovechar exclusivamente la parte temporal de la señal de pulsación espacio-temporal, mediante un sistema bactoelectrónico, y transformarla a los dominios sonoros, eliminando en cierto sentido la parte espacial de éstos y centrándose en la percepción de la sincronía de los pulsos a partir de la generación de un señalamiento sonoro en el que las variaciones de fluorescencia en el tiempo se asocian a variaciones de frecuencia. Por lo tanto en este caso de estudio, la contribución esencial pasa por sumar una modalidad sonora que en paralelo con el surgimiento de los patrones espacio-temporales visuales inherentes al sistema bacteriano permite disponer

globalmente de un sistema multimodal que aumenta las posibilidades de percepción y a la vez de comprensión del fenómeno.

En el sistema experimental del capítulo 3 la interpelación de los dominios sonoros es diferente al sistema anterior, aunque ambos sistemas biológicos estén compuestos por elementos bacterianos que se autoorganizan y crean patrones espacio-temporales. En este sistema experimental, a diferencia del sistema de quórum que está ingenearizado sintéticamente para crear patrones, las colonias de bacterias de *P. Dendritiformis* evolucionan “naturalmente” bajo ciertas condiciones ambientales hacia la formación de patrones espaciales. Por lo tanto a primera vista el patrón emergente en este sistema se percibe puramente en los dominios espaciales a partir del estado final de ordenamiento del sistema. La injerencia de los dominios sonoros y temporales en este sistema se estudia experimentalmente a partir de una posible señalización vibracional y acústica que se hipotetiza que media y actúa a nivel individual a partir del carácter vibratorio de las células y que en una escala mayor produce un señalamiento perceptible acústicamente. Así de esta manera la contribución del estudio de este sistema experimental nos sirve para interpretar dichos señalamientos acústicos como un elemento fundamental de los procesos biológicos en términos comunicacionales y metabólicos del sistema y para, igualmente que en el capítulo anterior, reforzar la idea que integrando modalidades perceptivas sonoras en el estudio de un sistema eso permite generar un mayor entendimiento global de este.

En el capítulo 4 tratamos dos sistemas a escalas de descripción espacial distintos y también de dominios del conocimiento diferentes. El primer sistema de metrónomos acoplados nos habla sobre un fenómeno de sincronía que se manifiesta tanto en los dominios espaciales, a partir de los patrones de posición de los péndulos, como de los dominios temporales, a partir de los patrones que exhiben las fases de éstos. No obstante la modalidad perceptiva inicial que exhibe el sistema es puramente visual y la contribución de la instalación que proponemos en este capítulo refuerza la parte de escucha sonora de dicho fenómeno. Igualmente que en los capítulos anteriores sumamos y reforzamos una dimensión sonora a la percepción del fenómeno de quimeras mecánicas permitiendo la

posibilidad de integrar la información de la emergencia del sistema desde otro canal perceptivo, generando así un entendimiento más amplio y universal. Por otro lado, en el caso del estudio de la formación de estructuras a nivel cosmológico incorporamos la dimensión sonora a partir de la inclusión de las teorías acústicas en la formación de las BAO en la época de la recombinación y del CMB y previamente a partir de la inclusión de las teorías de vibraciones cuánticas en los escenarios inflacionarios; donde ambas teorías nos sirven para explicar la emergencia y evolución de estructuras espaciales en el universo actual. En este caso, la incorporación de los dominios acústicos y vibratoriales no está enfocada, como en los capítulos anteriores, a añadir una modalidad perceptiva sino más bien a teorizar como desde los ámbitos del sonido, entendido de la manera más general posible, este nos permite adquirir un punto de vista en el que el surgimiento de estructuras espaciales en cierta medida está condicionado y determinado por fenómenos que no se manifiestan exclusivamente en estos dominios visuales.

Así de esta manera después de haber estudiado en conjunto diversos de sistemas experimentales, biológicos, mecánicos, cosmológicos, y que abarcan distintas escalas espaciales, micro, meso, macro, desde otra perspectiva cognitiva, esto nos induce a pensar que las propiedades de emergencia y de autoorganización que exhiben se pueden comprender de una manera más completa y general si se integran las modalidades perceptivas sonoras al análisis de dichos sistemas, ya que al añadir un estrato adicional de información se disponen de más mecanismos cognitivos de procesamiento para dar un sentido más global al entendimiento de los fenómenos complejos.

El haber aumentando nuestra metodología epistemológica a partir de la inclusión de elementos sonoros en las categorías de estudio de la complejidad nos ha permitido acrecentar el conocimiento de los fenómenos emergentes que inicialmente se presentaban por lo común principalmente desde los ámbitos estrictamente espaciales y visuales. Esto no quiere decir que para todos los sistemas complejos la inclusión de las dimensiones sonoras permita siempre un mayor entendimiento de los sistemas, o bien que exclusivamente el estudio de las estructuras sonoras, vibratoriales y acústicas permitan obtener siempre un

mayor beneficio para el estudio de los sistemas complejos. Para cada sistema en particular bajo estudio se debe identificar, tal y como hemos hecho, cuales son los mejores técnicas de investigación y en que casos la inclusión de una nueva modalidad perceptiva nos informa realmente del estado físico del sistema. Aquí en esta tesis y como conclusión reforzamos la idea de que vale la pena poner una atención desde diversos sentidos cuando estudiamos los sistemas complejos y analizar que posibles mecanismos de emisión de señales están presentes en éstos, y como observadores ver que otras modalidades perceptivas podemos incorporar para generar un entendimiento más universal de dichos fenómenos. El sonido finalmente, la percepción de éste y su entendimiento mediante diversos formalismos y sistemas de captación de datos experimentales, nos permite añadir una capa de entendimiento para complementar el conocimiento que extraemos a partir de otros métodos perceptivos y lógicos.

De esta manera regresando a la pregunta de investigación inicial que estructura esta tesis y se cuestiona si se puede percibir y entender la emergencia y la auto-organización dentro del marco de los fenómenos sonoros, respondemos que si se puede mediante una conjunción tanto de los análisis de dichos sistemas a partir de la reestructuración de los formalismos teóricos y también a partir de la generación de señales sonoras mediante la creación distintos sistemas experimentales que exhiban propiedades complejas.

En general solo decir que esta inquisición de ciertos fenómenos complejos desde los marcos sonoros propone complementar, por así decir, las modalidades de entendimiento, más que situarnos en una especie de cambio de paradigma del conocimiento. A nivel personal y brevemente, mi percepción y discernimiento de los fenómenos complejos, después de agregar y estudiar casos estructurados a partir de posibilidades de señalización sonora y vibracional, se ha abierto con respecto a mi visión previa de los inicios de la tesis.

### *Apuntes Colindantes*

- El documento escrito de esta tesis, junto a los archivos anexos de código, audio y vídeo, están disponibles en <https://carlestapi.hotglue.me>
- Esta tesis está escrita en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xa partir del *template* de Jeremie Gillet (version 0.3), utilizando ShareL<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Overleaf. La fuente está compilada en MacT<sub>E</sub>Xcon T<sub>E</sub>XMaker.
- Todo los contenidos de esta tesis quedan licenciados bajo Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional .



## Presentaciones ⊙

- ⊙ Seminario de Ciencias y Música; FaM, IIMAS, CENIDIM (Junio, 2017).
- ⊙ XI Coloquio de Estudiantes de Posgrado de la Facultad de Música; FaM (Junio 2017).
- ⊙ Seminario de Investigación en Música, Matemáticas y Cómputo, SEMIMÚTICAS; ENCRyM (Agosto 2017).
- ⊙ Seminario de Cómputos No Convencionales, SEMIMÚTICAS; Posgrado Estéticas UNAM (Septiembre, 2017).
- ⊙ Reunión de grupo; Instituto de Física UNAM- Cuernavaca (Junio, 2018).
- ⊙ “Colaboraciones críticas entre Arte, Ciencia y Tecnología”; C3 (Junio, 2018)
- ⊙ Seminario de Biología Sintética, Facultad de Ciencias UNAM; Biomédicas-UNAM (Agosto, 2018).
- ⊙ Seminario de Matemáticas, Facultad de Ingeniería; Instituto Tecnológico de Monterrey (Septiembre 2018).
- ⊙ XIV Encuentro Nacional de Biología Matemática; CIMAT (Octubre 2018).
- ⊙ Reunión de grupo, Laboratorio de Biología Sintética; CCG-UNAM (Octubre 2018).
- ⊙ Seminario de “Arte y Ciencia dentro del marco de la Complejidad”; C3-UNAM (Febrero, 2019).
- ⊙ XIII Coloquio de Estudiantes de Posgrado de la Facultad de Música; FaM (Mayo, 2019).
- ⊙ Reunión de grupo, KeymerLAB; PUC Chile (Noviembre, 2019)
- ⊙ Reunión de grupo, Active-Matter Physics; Universidad de Chile(Enero, 2020)

## Actividades Paralelas ⊗

- ⊗ Creación del proyecto de arte sonoro “La Virgen del Plug” (Noviembre 2016).
- ⊗ Jam de Investigación Científica, Arte Alameda - Fundación Alumnos 47 (Enero 2017).
- ⊗ Creación del proyecto de nuevos medios y educación experimental “Laboratorio de Medios Inestables” (<https://espectrodelespectro.hotglue.me/>) (Febrero 2017).
- ⊗ Creación de las primeras residencias de arte sonoro “Espectro del Espectro”, en el centro cultural Espectro Electromagnético (Abril-Agosto 2017).
- ⊗ Taller de verano de la Fundación Alumnos 47 (Junio 2017).
- ⊗ Estancia en el Fitzwillian College, Cambridge University (Agosto - Septiembre 2017).
- ⊗ Exposición colectiva con “La Virgen del Plug”, en el segundo open-studio del Espectro Electromagnético (Noviembre 2017).
- ⊗ Colaboración en la creación del centro de arte Los 14, exposición inaugural con “La Virgen del Plug” (Febrero 2018).
- ⊗ Creación del programa “La Virgen del Sub” en Radio Nopal (Junio 2018-Octubre2019).
- ⊗ Creación de las segundas residencias de arte sonoro “Espectro del Espectro”, en el centro de arte Los 14 (Agosto-Diciembre 2018).
- ⊗ Escuela de Verano QBIO, CCG-UNAM (Agosto 2018).
- ⊗ Coordinación del taller “Comunicaciones Especulativas” con Interspecifics en el C3-UNAM (Septiembre, 2018).
- ⊗ XX Escuela Nacional de Biología Matemática; CIMAT (Octubre 2018).

- 
- ⊗ Coordinación del primer “Hackatón Astronómico” IA-UNAM y Programa ACT (Noviembre 2018).
  - ⊗ Creación del proyecto “Caravana de Ensayistas” para el encuentro de Pedagogías Empáticas, MUAC - Fundación Alumnos 47 (Diciembre 2018).
  - ⊗ Creación sonora para la obra “Más Corazón Que Piel” con “La Virgen del Plug”, Teatro de la Ciudad CDMX (Enero 2019).
  - ⊗ Residencia en el centro de arte comunitario Platohedro (Med. COL.), con el proyecto del “Laboratorio de Medios Inestables” (Septiembre-Octubre 2019).
  - ⊗ Creación del primer “Encuentro InfraSonoro”, Museo Arte Moderno de Medellín (Octubre 2019).
  - ⊗ Coordinación del segundo “Hackatón Astronómico” IA-UNAM y Programa ACT (Noviembre 2019).
  - ⊗ Estancia en el KeymerLAb, Departamento de Ecología y Biología de la P.Universidad Católica de Chile (Noviembre 2019 - Febrero 2020).

## Nota Final

Para algunos lectores, si es que acaso podemos determinar con certeza que los hay (¿quiénes son? ( $\Delta p$ ), ¿dónde están? ( $\Delta x$ )), esta tesis pueda parecer un juego. La ciencia al igual que la poesía juega a hacer versos. En la poética del *samplear* pensamientos, frases y ecuaciones al vuelo, en la poética del reinterpretar divagando oscuros conceptos etéreos. Quizá todo este despliegue tan sólo consiste tal vez en el revolotéo y el *twerking* del lenguaje propagándose en ambos reinos. Así el último pensamiento viene de la voz de Jaime Gil de Biedma:

“ El juego de hacer versos  
—que no es un juego— es algo  
parecido en principio  
al placer solitario.

Con la primera muda  
en los años nostálgicos  
de nuestra adolescencia,  
a escribir empezamos.

Y son nuestros poemas  
del todo imaginarios  
—demasiado inexpertos  
ni siquiera plagiamos—

porque la Poesía  
es un ángel abstracto  
y, como todos ellos,  
predispuesto a halagarnos.

El arte es otra cosa  
distinta. El resultado  
de mucha vocación  
y un poco de trabajo.

Aprender a pensar  
en renglones contados  
—y no en los sentimientos  
con que nos exaltábamos—,

tratar con el idioma  
como si fuera mágico  
es un buen ejercicio,  
que llega a emborracharnos.

Luego está el instrumento  
en su punto afinado:  
la mejor poesía  
es el Verbo hecho tango.

Y los poemas son  
un modo que adoptamos  
para que nos entiendan  
y que nos entendamos.

Lo que importa explicar  
es la vida, los rasgos  
de su filantropía,  
las noches de sus sábados.

La manera que tiene  
sobre todo en verano  
de ser un paraíso.  
Aunque, de cuando en cuando,

si alguna de esas nubes  
que las carga el diablo  
uno piensa en la historia  
de estos últimos años,

si piensa en esta vida  
que nos hace pedazos  
de madera podrida,  
perdida en un naufragio,

la conciencia le pesa  
—por estar intentando  
persuadirse en secreto  
de que aún es honrado.

El juego de hacer versos,  
que no es un juego, es algo  
que acaba pareciéndose  
al vicio solitario.

”

# Cloenda Poética¶

Si hay alguien que en este punto ha cometido el desliz de buscar un común denominador entre cada una de las letras, hormiguitas de papel, anteriormente escritas, se ha dado cuenta que éste es, aunque habite en un estado de confusa superposición constructiva y destructiva, **la vibración**¶.

La vibración de unos números zigzagueando en el tiempo. La vibración de unas bacterias conversando mientras van dividiéndose. La vibración de unos péndulos reiterando sus tic tacs sincro y asincronizadamente. La vibración como el único modo posible en el que todo hasta hoy se ha ido expandiendo.

La vibración entre dos palabras y miradas que se cruzan. La vibración del olfato, de la caricia y del sexo. La vibración atractiva entre gametos y la de la mitosis exponenciándose en este ir viviendo.

La vibración inhalar y exhalar, reír y llorar y dormir y ser, día a día, un poco más conscientes.

La vibración de mis sinapsis ahora que escribo el final de esta tesis.

La vibración de mis sinapsis ahora que os lo leo.

La vibración de mis palabras propagándose esféricamente en este aire, la vibración del aire con las palabras que ahora os estoy leyendo. La vibración del aire que envuelve al aire de mis palabras, hasta chocar con la atmósfera para que ya en el espacio vacío empiecen a disolverse.

---

¶Texto para ser leído al final de la presentación de defensa de la tesis.

¶El lexema *vibra-* aparece 186 veces en esta tesis (incluyendo esta sección y esta nota a pie de página).



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

La vibración de tus sinapsis cuando yo estaba escribiendo este texto. La vibración de tus sinapsis ahora que me escuchas.

La vibración del conjunto de vibraciones que hacen que piense y que escriba: "la vibración de tus sinapsis ahora que me escuchas", mientras escuchas "la vibración de tus sinapsis ahora que me escuchas". (¡Ojo!, o más bien ¡Oído!, a estos estados de vibración recursivos o recurrentes).

La vibración entera de todo mi ser que ahora está hablando, mientras sostiene entre sus manos este papel, que contiene la vibración mental que mi otro yo ha codificado en estas letras, que ahora mi yo lee de la letra que el otro yo ha escrito en este papel, que ahora tengo entre mis manos.

La vibración disociada de mis yos, la vibración del pasado y la vibración del presente.

La vibración nula, su vibración antagónica que es la vibración existente.

La vibración que se localiza y después se disuelve en un mismo espacio, creando información, o lo que es lo mismo, dos estados físicos distinguibles diferentes.

La vibración dicotómica entre la nada y lo que se percibe.

La vibración binaria, la vibración evanescente.

La vibración en los intersticios y la del más allá de los límites que creamos consciente e inconscientemente.

La vibración que existe pero que nunca jamás se va a percibir.

La mínima vibración cuántica y la máxima vibración del Universo.

La vibración más allá de la última frontera. La vibración que alcanzará lugares donde ninguna vibración ha podido antes llegar.

La vibración de la historia de todas las vibraciones imprimiendo inexorablemente sus huellas en la materia para siempre.

La vibración de la materia intentando rescatar los rastros de las vibraciones vivas e inertes. La vibración causal o una vibración que no es principio ni resultante.

Será que existió y que aún existe y perdura la vibración primera?

La vibración oscura.

La vibración del xilófono, la del hueso percutiendo en la piedra. La vibración unga unga unga chaka unga.

La vibración del lenguaje y sus sombras. El lenguaje de las plantas y de los peces.

La vibración del verbo que hace vibrar al idioma como si fuera mágico y a la vez menos sincero.

La vibración poética, línea a línea, la vibración intentando orientarse en el desierto alfanumérico.

La vibración abiótica que habita en la roca, en el humo, en el rayo, en la nieve. La vibración biológica de la célula, del tejido, de la serpiente.

La vibración que se toca, la vibración que se siente. La vibración más sutil, la vibración más presente.

La vibración me habla mientras le hablo a la vibración.

La vibración de ida y vuelta entre el espejo y la mente.

La vibración que enamora, la vibración que repele.

La vibración que modula lo que estamos sintiendo. La vibración escondida y enlazada entre otras vibraciones que nos otorgará con el tiempo un sentir.

La cadena de vibraciones que se esconden en el gesto.

La vibración si breve (chasquido), vibra al menos dos veces.

La vibración es positiva. (Positive vibration, Yeah! Positive!).

La vibración ataca, se sostiene y finalmente languidece.

La vibración es sedante cuando te invita y entras en resonancia con ella pasivamente.

La vibración, ayúdame Obi-Wan Kenobi, yo creo en la fuerza.

La vibración se dilata o contrae si es que soy yo o eres tu el punto referente.

La vibración caprichosa, que cambia de forma a su antojo si es que me aproximo o me estoy yendo.

La vibración un número, que persigue y atrapa al siguiente.

La vibración y su flecha, en contra y a favor de la corriente.

La vibración de una lágrima es una lágrima, son muchas lágrimas, es ruido blanco, es

la tormenta.

La vibración se enreda entre puntos, líneas y puentes.

La vibración estable, estacionaria, que no siempre cuando se mide es más certera.

La vibración difusa, la vibración viajera.

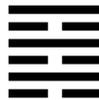
La vibración en este vuelo sin orillas, desesperadamente.

La vibración se expande, la vibración se expande, la vibración se expande, mientras digo que “la vibración se expande, la vibración se expande, la vibración se expande...”, mientras que, mientras que, mientras, mientras, mientr, mient, mie, mi, m, mm, mmm, hummm, hummmm, ohmmmm, ohmmmm, ohmmmm...

La vibración del Cosmos.

La vibración del Silencio.

\*\*



---

\*\* (... y la vibración de uno, dos, o quizá más aplausos organizándose entre si como ríos, para negarle su identidad al silencio que, como la mar de Manrique, es la muerte.)

## Anexo 1 de la Fonoteca de Babel

Si el espacio es infinito, estoy en cualquier sitio, si el tiempo es infinito, vivo en cualquier momento, si la Fonoteca no tiene centro, cualquier avance es una Utopía, un paso en el trayecto hacia dónde no hay lugar.

*Eppur' mi nuovo.* Atravesando puertas, tanteando una orografía que se ha ido orientando en parte debido a las escuchas dentro de los pentágonos por los que he discurrido, y en parte por los encuentros y conversaciones sucedidas en éstos, y entre los caminos que los unen, con fonotecarios de variada índole. Últimamente, al parecer, también por algo que se puede conceptualizar como una brújula interna propioceptiva, la cuál oscilaría incesantemente entre el mundo fenomenológico de mi cuerpo y el campo perceptual multisensorial de mi entorno. La cuestión, y ya fuera de diatribas cognitivas que no vienen al caso, es que me he movido y me sigo moviendo. La otra cuestión es que no todo los fonotecarios lo han hecho.

He escuchado sobre y he oído, aunque no he permanecido el tiempo suficiente para atestiguarlo irrefutablemente, de fonotecarios que han habitado un único pentágono de la Fonoteca. Éstos, dentro del perímetro cerrado de una sala, han dedicado toda una vida a la escucha de un solo sonido, mantra percutivo loopeado eternamente. Es posible imaginar, más allá del estado de hipnosis limítrofe a la esquizofrenia, la hipersensibilidad perceptiva adquirida de cada una de las aristas que estructura dicho sonido.

Hablan y hablo, no sólo cuando hay algún oyente, de un fonotecario ya viejo que pasó los primeros y últimos años de su vida obsesionado con un intersticio de silencio entre dos vocablos aparentemente triviales. Como si su oído debido a la inmersión sonora



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

permanente hubiera desarrollado una habilidad de magnificación, al cabo de los años logró amplificar ese fragmento vacío hasta que éste se empezó a llenar.

Y en su acontecer lo hizo de manera gradual. Primero de entre los dos vocablos emergieron borrosamente, casi como fantasmagorías, tres subvocablos: un atisbo desfigurado de inicio de historia. A partir de aquí el tiempo y una dedicación reverente hacia la escucha obsequiaron al fonotecario con ocho subsubvocablos más: cuatro pertenecientes al subsilencio entre el primero y segundo subvocablo y otros cuatro en el subsilencio entre el segundo y tercero. A la vez esta aparición engendró irremediabilmente seis subsubsilencios, los cuáles fueron materia de averiguación posterior por parte del fonotecario, el cuál, ya embebido en un estado de nitidez sonora plenamente afilado, prosiguió internándose en la exploración de n-éssimos sub... subvocablos cada vez más indesgranables, los cuáles iban goteando de la serie en descendencia geométrica de un silencio.

De esta manera, de la progresión de todos los vocablos escondidos dentro de la nada aparente, algunos de los cuales no llegaban ni a ser tan solo un fonema entero, se dice que el fonotecario llegó a un silencio a partir del cuál ya no pudo rescatar ningún tipo de materia sonora, nada ni con ni sin sentido, nada, tan sólo el silencio: el silencio final.

Más allá de la inferencia sobre la existencia de un sonido y a la vez de un silencio último, también se dice que en la concatenación jerárquica de todos los vocablos, la suma final de éstos arrojaba las instrucciones detalladas del mapa que conduce hasta el centro de la Fonoteca. Se habla sin embargo que este fonotecario murió, y que lo hizo en el pentágono que lo cobijó a lo largo de su vida, o gran parte de ella, al recordar que los dos primeros términos origen de su incisión en el silencio eran “No” “Verdad”.

## Anexo 2 de la Fonoteca de Babel

Ya que es razonablemente difícil descubrir el origen de la Fonoteca, es razonablemente aceptable que los fonotecarios lo inventemos.

Cíclicamente, durante las festividades del nacimiento de ésta, grupos de fonotecarios, que peregrinan desde los extremos más remotos, se congregan en masa dentro de un pentágono para recrear su creación. Acreándose de uno en uno entorno al disco central, se trasladan alrededor de éste mientras rotan simultáneamente sobre su propio eje, emulando su sentido de giro en un baile vortificado que, ni en apariencia global ni local, concuerda aparentemente con el sonido que emana del disco en cuestión.

Definitivamente la Fonoteca se puede describir pero no definir. Aún así la Fonoteca y los fonotecarios no son categorías filosóficas equiparables. Uno puede pensar, teleológicamente, que la Fonoteca es simplemente una estrategia para mantener un cierto orden en si misma, mientras que los fonotecarios somos solo las entidades encargadas de hacerlo.

Son. Yo más bien soy de los que se quedan escuchando expectante y pasivamente desde un rincón incrédulo, aunque no por eso no maravillado, en este rito de éxtasis grupal. Decididamente mi estática no contribuye a este supuesto orden subyacente aunque mi escucha aspire a su humilde comprensión. Más allá de este segregacionismo vanidoso y de estas vanas expectativas de pensador, esta escucha en cuestión ha labrado de entre todas mis convicciones una quimera que ahora quiero trasladar.

Durante una de mis primeras derivas solitarias de juventud, y que ahora recuerdo levemente como un frágil tránsito onírico, cerca o ya en las infralitudes de la Fonoteca, me encontré con los trazos de unas ruinas de un pentágono dispersas en el suelo sobreviviendo

ante mi a través de lo que parecía otro tiempo. Enterrado ahí entre los restos se escuchaba aún intacto el sonido del disco, el cual ante mi conmoción, giraba levógicamente como nunca había o he vuelto a percibir.

De mis escasos conocimientos arqueológicos me es difícil inferir si lo que descubrí entre esas ruinas, y en los vagos rastros circulares difuminados de su alrededor, eran los restos en desuso de un antiguo pentágono habitado por fonotecarios en otro tiempo. Del recuerdo del sonido que ahí escuché he ido despedazando con paciencia varias deducciones de las cuales tan sólo una cobra realmente sentido ahora.

A partir de un ejercicio, a contracorriente de mi memoria y a favor de la inversión temporal, he ido rebobinando mentalmente ese sonido hasta su reconstrucción, probablemente parcial, llegando a concluir, con una certeza que oscila con mi estado de ánimo, que el sonido invertido de ese pentágono en ruinas tiene que ser el mismo que suena en las celebraciones en el pentágono actual.

Si mi equiparación no anda inconscientemente desorientada por un tributo estético al concepto de completitud, debe existir una especie de equilibrio racémico natural operando en la Fonoteca, en el que uno o quizás dos demiurgos, quien sabe si en competencia o en estrecho vínculo de complementariedad, han dispuesto en su largo y ancho pares de discos con dualidad quiral.

Si es verdad, es bello. Si es bello, es.

## Anexo 3 de la Fonoteca de Babel

Existen regiones de la Fonoteca en las cuales para poder acceder a sus salas se necesitan ciertos permisos, los cuales son gestionados por una casta de fonotecarios de los que, si redondeáramos por encima su ética, se podría sostener a lo más que sus principios son llanamente aleatorios.

¿Quién podría proclamar que nunca estuvo enredado en un nudo topológico burocrático para poder entrar a escuchar el canto endosimbionte del agua y el cristal? ¿Quién no desesperó para poseer la palabra del sello rojo del pentágono donde suena la incisión del veneno onírico de la araña?

Intentando eludir, como otros tantos, las gestiones de lógicas enfebrecidas y este enjambre de supuesta legalidad, no se bien como sucede pero uno siempre acaba convergiendo ante este clan del juicio binario y con su trivialidad.

Basta decir que en estrecha proximidad a éstos hay otra clase de fonotecarios colindantes, más imponentes, que en las grietas de su rigidez median frente a las puertas de los pentágonos el sí y el no acerca de quién puede pasar.

Y como ejemplo mítico de absurdidad ahí está la historia acerca del proceso de como le cerraron la puerta de un pentágono a un fonotecario, en el que supuestamente solo él estaba destinado a entrar.

Otras historias circulan acerca del pentágono que contiene adentro en su sonido todas las claves, contraseñas y códigos de todos los pentágonos restringidos y a parte de todos éstos un prototipo de fonema, del que rumorean que cuesta toda una vida el lograrlo pronunciar, el cual actuaría como una especie de llave universal. Igualmente para poder

---

penetrar a ese pentágono también dicen que sus guardianes piden un vocablo para su acceso, el cual por lógica de conjuntos se esperaría que habitara latente ahí adentro, pero quién sabe si también existe y se puede descubrir en algún otro lugar.

En este punto quisiera dejar constancia al menos de la palabra que otorga el acceso a los pentágonos restringidos que contienen los sonidos que aún no existen pero que en algún momento se va a crear, aún así no puedo.

# Apéndice A

## Anexo Capítulo 1

### A.1. Generación de Ruidos y de Funciones de Auto-Correlación

```
1 #!/usr/bin/env python2
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4 Created on Fri Mar 22 14:37:14 2019
5
6 @author: carlestapi
7
8 tema: Ruidos y Espectros y Estadísticas Varias
9 """
10
11 from __future__ import print_function, division
12
13 import thinkdsp
14 import thinkplot
15 import thinkstats2
16 import numpy as np
17 import math
```

```
18 import pandas as pd
19 import matplotlib.pyplot as plt
20 import warnings
21
22 warnings.filterwarnings('ignore')
23
24 from fbm import FBM
25 from fbm import MBM
26 from stochastic.noise.colored_noise import BrownianNoise
27 from stochastic.noise.colored_noise import PinkNoise
28
29 PI2 = 2 * np.pi
30
31 np.set_printoptions(precision=3, suppress=True)
32
33 #N mero de samples
34 n=10000
35
36 ##### Realizaciones de Ruidos #####
37
38 #PINK
39 pn = PinkNoise(t=n)
40 s = pn.sample(n)
41 times = pn.times(n)
42
43 #BROWNIAN
44 bn = BrownianNoise (t=n)
45 sample = bn.sample(n)
46 tempus = bn.times (n)
47
48 #FRACTIONAL BROWNIAN MOTION
49 f = FBM(n=n, hurst=0.5, length=n, method='daviesharte')
50 fbm_sample = f.fbm()
```

```
51 t_values = f.times()
52
53 #MULTI FRACTIONAL BROWNIAN MOTION
54 ### Example Hurst function with respect to time.
55 def h(t):
56     return 0.25 * math.sin(20*t) + 0.5
57
58 m = MBM(n=n, hurst=h, length=n, method='riemannliouville')
59 mbm_sample = m.mbm()
60 t_valuesMBM = m.times()
61
62 ##### Creaci n de Ondas y Espectros de Ruidos
63 #####
64
65 PN = thinkdsp.Wave(s,times)
66 PNspectrum = PN.make_spectrum()
67 PNspectrum.plot_power(label='PN')
68 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Amplitude',
69                  xscale='log',yscale='log')
70
71 PN.write(filename='PinkNoise.wav')
72
73
74 PNamps = PNspectrum.amps
75 PNfs = PNspectrum.fs
76
77
78 BN = thinkdsp.Wave(sample, tempus)
79 BNspectrum = BN.make_spectrum()
80 BNspectrum.plot_power(label='BN')
81 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Amplitude',
82                  xscale='log',yscale='log')
83
84 BN.write(filename='BrownianNoise.wav')
85
86
87 BNamps = BNspectrum.amps
88 BNfs = BNspectrum.fs
```

```
83
84
85 FBM = thinkdsp.Wave(fbm_sample, t_values)
86 FBM_spectrum = FBM.make_spectrum()
87 FBM_spectrum.plot_power(label='FBM')
88 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Amplitude',
89                 xscale='log', yscale='log')
90 FBM.write(filename='FractionalBrownianMotion.wav')
91
92 FBM_amps = FBM_spectrum.amps
93 FBM_fs = FBM_spectrum.fs
94
95 MBM = thinkdsp.Wave(mbm_sample, t_valuesMBM)
96 MBM_spectrum = MBM.make_spectrum()
97 MBM_spectrum.plot_power(label='MBM')
98 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Amplitude',
99                 xscale='log', yscale='log')
100 MBM.write(filename='MultiFractionalBrownianMotion.wav')
101
102 MBM_amps = MBM_spectrum.amps
103 MBM_fs = MBM_spectrum.fs
104
105 plt.show()
106
107 ##### Pendientes de Ruido #####
108
109 slopePN = PNspectrum.estimate_slope().slope
110 slopeBN = BNspectrum.estimate_slope().slope
111 slopeFBM = FBM_spectrum.estimate_slope().slope
112 slopeMBM = MBM_spectrum.estimate_slope().slope
113 print('Pendientes Espectros:')
114 print(slopePN, slopeBN, slopeFBM, slopeMBM)
115
```

```
116 ##### Correlaciones Seriales (copia a 1 paso, lag=1)
117 #####
118 def serial_corr(wave, lag=1):
119     N = len(wave)
120     y1 = wave.ys[lag:]
121     y2 = wave.ys[:N-lag]
122     corr = np.corrcoef(y1, y2, ddof=0)[0, 1]
123
124     return corr
125
126 serialPN = serial_corr(PN)
127 serialBN = serial_corr(BN)
128 serialFBM = serial_corr(FBM)
129 serialMBM = serial_corr(MBM)
130 print('Correlaciones Seriales:')
131 print(serialPN, serialBN, serialFBM, serialMBM)
132
133 ##### AutoCorrelaciones ABSOLUTAS#####
134
135 def autocorr(wave):
136     global lags
137     lags = range(len(wave.ys)//2)
138     corrs = [serial_corr(wave, lag) for lag in lags]
139     return lags, corrs
140
141 lagsPN, corrsPN = autocorr(PN)
142 thinkplot.plot(lagsPN, corrsPN, label='PN')
143
144 lagsBN, corrsBN = autocorr(BN)
145 thinkplot.plot(lagsBN, corrsBN, label='BN')
146
147 lagsFBM, corrsFBM = autocorr(FBM)
```

```
148 thinkplot.plot(lagsFBM, corrsFBM, label='FBM')
149
150 lagsMBM, corrsMBM = autocorr(MBM)
151 thinkplot.plot(lagsMBM, corrsMBM, label='MBM')
152
153 thinkplot.config(xlabel='Lag',
154                 ylabel='Correlation', legend=True)
155
156 plt.show()
157
158 ##### Otra manera de calcular Auto-Correlaciones Absolutas
159
160 import statsmodels.tsa.stattools as smtsa
161
162 acfPN = smtsa.acf(s, nlags=n//2-1, unbiased=False)
163 thinkplot.plot(lags, acfPN, label='PN')
164
165 acfBN = smtsa.acf(sample, nlags=n//2-1, unbiased=False)
166 thinkplot.plot(lags, acfBN, label='BN')
167
168 acfFBM = smtsa.acf(fbm_sample, nlags=n//2-1, unbiased=False)
169 thinkplot.plot(lags, acfFBM, label='FBM')
170
171 acfMBM = smtsa.acf(mbm_sample, nlags=n//2-1, unbiased=False)
172 thinkplot.plot(lags, acfMBM, label='MBM')
173
174 thinkplot.config(xlabel='Lag',
175                 ylabel='Correlation Function',
176                 xlim=[0, 3], legend=True
177                 )
178 plt.show()
179
180 ##### Frequency & Period Weighed Average of Spectrums
```

```
#####  
181  
182 waveragePN , sumPN = np.average(PNfs,weights=PNamps,returned=True)  
183 waverageBN , sumBN = np.average(BNfs,weights=BNamps,returned=True)  
184 waverageFBM , sumFBM = np.average(FBMfs,weights=FBMamps,returned=True)  
185 waverageMBM , sumMBM = np.average(MBMfs,weights=MBMamps,returned=True)  
186  
187 waveragePN = waveragePN/sumPN  
188 waverageBN = waverageBN/sumBN  
189 waverageFBM = waverageFBM/sumFBM  
190 waverageMBM = waverageMBM/sumMBM  
191  
192 print('Frecuencia Promedio Espectro:')  
193 print(waveragePN, waverageBN, waverageFBM, waverageMBM)  
194  
195 paveragePN = n/(2*waveragePN)  
196 paverageBN = n/(2*waverageBN)  
197 paverageFBM = n/(2*waverageFBM)  
198 paverageMBM = n/(2*waverageMBM)  
199  
200 print('Periodo Promedio Espectro:')  
201 print(paveragePN, paverageBN, paverageFBM, paverageMBM)  
202  
203  
204 #####%%%%%%%%%% Per odos Propios  
205  
206 PlagsPN = np.divide(lagsPN, paveragePN)  
207 PlagsBN = np.divide(lagsBN, paverageBN)  
208 PlagsFBM = np.divide(lagsFBM, paverageFBM)  
209 PlagsMBM = np.divide(lagsMBM, paverageMBM)  
210  
211  
212 print('lags:', paverageMBM )
```

```
213
214
215 ##### TESTS EVALUACIONES TIEMPOS PROPIOS DE LA SERIE
216 #####
217
218 #for index, item in enumerate(PlagsPN):
219 #    print(index, item)
220
221
222 ##### AutoCorrelaciones PROPIAS#####
223
224
225
226 thinkplot.plot(PlagsPN, corrsPN, label='PN')
227 thinkplot.plot(PlagsBN, corrsBN, label='BN')
228 thinkplot.plot(PlagsFBM, corrsFBM, label='FBM')
229 thinkplot.plot(PlagsMBM, corrsMBM, label='MBM')
230 thinkplot.config(xlabel='Lag Propio',
231                  ylabel='Correlation Tiempo Propio', legend=True)
```

## A.2. Unconventional Stochastic Sounds

### Unconventional Noise

```
1 #!/usr/bin/env python2
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4 Created on Tue Apr 30 19:50:26 2019
5
6 @author: carlestapi
7 """
8
9 from __future__ import print_function, division
10
```

```
11 import thinkdsp
12 import thinkplot
13 import numpy as np
14 import pandas as pd
15 import scipy.signal
16 import math
17 import matplotlib.pyplot as plt
18 import warnings
19
20 warnings.filterwarnings('ignore')
21
22 ##### NOISE libs
23
24 from stochastic.noise.colored_noise import BlueNoise
25 from stochastic.noise.colored_noise import BrownianNoise
26 from stochastic.noise.colored_noise import RedNoise
27 from stochastic.noise.colored_noise import PinkNoise
28 from stochastic.noise.colored_noise import VioletNoise
29 from stochastic.noise.colored_noise import WhiteNoise
30 from stochastic.noise.colored_noise import ColoredNoise
31 from stochastic.noise import GaussianNoise
32 from stochastic.noise import FractionalGaussianNoise
33
34 from fbm import MBM
35
36 ##### Realizaciones Ruidos
37
38 global t
39 t=10000
40 global n
41 n=10000
42
43 bn=BlueNoise(t)
```

```
44 sbn=bn.sample(n)
45 tbn=bn.times(n)
46
47 br=BrownianNoise(t)
48 sbr=br.sample(n)
49 tbr=br.times(n)
50
51 rn=RedNoise(t)
52 srn=rn.sample(n)
53 trn=rn.times(n)
54
55 pn=PinkNoise(t)
56 spn=pn.sample(n)
57 tpn=pn.times(n)
58
59 vn=VioletNoise(t)
60 svn=vn.sample(n)
61 tvn=vn.times(n)
62
63 wn=WhiteNoise(t)
64 swn=wn.sample(n)
65 twn=wn.times(n)
66
67 gn=GaussianNoise(t)
68 sgn=gn.sample(n)
69 tgn=gn.times(n)
70 tgn=np.delete(tgn,np.s_[:1])
71
72 fgn=FractionalGaussianNoise(hurst=0.75,t=10000)
73 sfgn=fgn.sample(n)
74 tfgn=fgn.times(n)
75 tfgn=np.delete(tfgn,np.s_[:1])
76
```

```
77 ##### Multi Fractional Gaussian Noise de la librer a fbm
78
79 # Example Hurst function with respect to time.
80 def h(t):
81     return 0.75 - 0.5 * t
82
83 m = MBM(n=1024, hurst=h, length=1, method='riemannliouville')
84
85
86 # Generate a mGn realizations
87 smgn = m.mgn()
88
89 # Get the times associated with the mBm
90 tmgn = m.times()
91 tmgn=np.delete(tmgn,np.s_[1])
92 #####
93
94
95 BN = thinkdsp.Wave(sbn,tbn)
96 BNspectrum = BN.make_spectrum()
97 BN.write(filename='BlueNoise.wav')
98
99 BR = thinkdsp.Wave(sbr,tbr)
100 BRspectrum = BR.make_spectrum()
101 BR.write(filename='BrownianNoise.wav')
102
103 RN = thinkdsp.Wave(srn,trn)
104 RNspectrum = RN.make_spectrum()
105 RN.write(filename='RedNoise.wav')
106
107 PN = thinkdsp.Wave(spn,tpn)
108 PNspectrum = PN.make_spectrum()
109 PN.write(filename='PinkNoise.wav')
```

```
110
111 VN = thinkdsp.Wave(svn, tvn)
112 VNspectrum = VN.make_spectrum()
113 VN.write(filename='VioletNoise.wav')
114
115 WN = thinkdsp.Wave(swn, twn)
116 WNspectrum = WN.make_spectrum()
117 WN.write(filename='WhiteNoise.wav')
118
119 GN = thinkdsp.Wave(sgn, tgn)
120 GNspectrum = GN.make_spectrum()
121 GN.write(filename='GaussianNoise.wav')
122
123 FGN = thinkdsp.Wave(sfgn, tfgn)
124 FGNspectrum = FGN.make_spectrum()
125 FGN.write(filename='FractionalGaussianNoise.wav')
126
127 MGN = thinkdsp.Wave(smgn, tmgn)
128 MGNspectrum = MGN.make_spectrum()
129 MGN.write(filename='MultiFractionalGaussianNoise.wav')
130
131 ##### Plot Se al
132
133 plt.plot(BN.ts, BN.ys)
134 plt.legend(['Blue Noise'])
135 plt.show()
136
137 plt.plot(BR.ts, BR.ys)
138 plt.legend(['Brownian Noise'])
139 plt.show()
140
141 plt.plot(RN.ts, RN.ys)
142 plt.legend(['Red Noise'])
```

```
143 plt.show()
144
145 plt.plot(PN.ts,PN.ys)
146 plt.legend(['Pink Noise'])
147 plt.show()
148
149 plt.plot(VN.ts,VN.ys)
150 plt.legend(['Violet Noise'])
151 plt.show()
152
153 plt.plot(WN.ts,WN.ys)
154 plt.legend(['White Noise'])
155 plt.show()
156
157 plt.plot(tgn,sgn)
158 plt.legend(['Gaussian Noise'])
159 plt.show()
160
161 plt.plot(tfgn,sfgn)
162 plt.legend(['Fractional Gaussian Noise'])
163 plt.show()
164
165 plt.plot(tmgn,smgn)
166 plt.legend(['Multi Fractional Gaussian Noise'])
167 plt.show()
168 ##### Slope Espectro
169
170 slopeBN = BNspectrum.estimate_slope().slope
171 slopeBR = BRspectrum.estimate_slope().slope
172 slopeRN = RNspectrum.estimate_slope().slope
173 slopePN = PNspectrum.estimate_slope().slope
174 slopeVN = VNspectrum.estimate_slope().slope
175 slopeWN = WNspectrum.estimate_slope().slope
```

```
176 slopeGN = GNspectrum.estimate_slope().slope
177 slopeFGN = FGNspectrum.estimate_slope().slope
178 slopeMGN = MGNspectrum.estimate_slope().slope
179
180 print('Slopes:')
181 print('BN',slopeBN)
182 print('RN',slopeRN)
183 print('PN',slopePN)
184 print('VN',slopeVN)
185 print('WN',slopeWN)
186 print('GN',slopeGN)
187 print('FGN',slopeFGN)
188 print('MGN',slopeMGN)
189
190 ##### Plot Espectro
191
192 BRspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta BR',slopeBR))
193 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
194                 xscale='log',yscale='log',low=0)
195 plt.show()
196
197 BNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta BN',slopeBN))
198 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
199                 xscale='log',yscale='log',low=0)
200 plt.show()
201
202 RNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta RN',slopeRN))
203 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
204                 xscale='log',yscale='log',low=0)
205 plt.show()
206
207 PNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta PN',slopePN))
208 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
```

```
209         xscale='log',yscale='log',low=0)
210 plt.show()
211
212 VNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta VN',slopeVN))
213 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
214                 xscale='log',yscale='log',low=0)
215 plt.show()
216
217 WNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta WN',slopeWN))
218 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
219                 xscale='log',yscale='log',low=0)
220 plt.show()
221
222 GNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta GN',slopeGN))
223 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
224                 xscale='log',yscale='log',low=0)
225 plt.show()
226
227 FGNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta FGN',slopeFGN))
228 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
229                 xscale='log',yscale='log',low=0)
230 plt.show()
231
232 MGNspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta MGN',slopeMGN))
233
234 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
235                 xscale='log',yscale='log',low=0)
236 plt.show()
```

## Unconventional Stochastic

```
1 #!/usr/bin/env python2
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
```

```
4 Created on Sun Jul 28 15:06:18 2019
5
6 @author: carlestapi
7 """
8
9
10 from __future__ import print_function, division
11
12 import thinkdsp
13 import thinkplot
14 import numpy as np
15 import pandas as pd
16 import scipy.signal
17 import math
18 import matplotlib.pyplot as plt
19 import warnings
20
21 warnings.filterwarnings('ignore')
22
23 ##### STOCHASTIC libs
24
25 from stochastic.continuous.bessel import BesselProcess
26 from stochastic.continuous.brownian_bridge import BrownianBridge
27 from stochastic.continuous.brownian_excursion import BrownianExcursion
28 from stochastic.continuous.brownian_meander import BrownianMeander
29 from stochastic.continuous.brownian_motion import BrownianMotion
30 from stochastic.continuous.cauchy import CauchyProcess
31 from stochastic.continuous.fractional_brownian_motion import
    FractionalBrownianMotion
32 from stochastic.continuous.gamma import GammaProcess
33 from stochastic.continuous.geometric_brownian_motion import
    GeometricBrownianMotion
34 from stochastic.continuous.inverse_gaussian import
```

```
InverseGaussianProcess
35 from stochastic.continuous.mixed_poisson import MixedPoissonProcess
36 from stochastic.continuous.multifractional_brownian_motion import
    MultifractionalBrownianMotion
37 from stochastic.continuous.poisson import PoissonProcess
38 from stochastic.continuous.squared_bessel import SquaredBesselProcess
39 from stochastic.continuous.variance_gamma import VarianceGammaProcess
40 from stochastic.continuous.wiener import WienerProcess
41
42 from fbm import MBM
43
44
45 ##### Realizaciones Ruidos
46
47 global t
48 t=10000
49 global n
50 n=10000
51
52
53 bp=BesselProcess(dim=1,t=10)
54 sbp=bp.sample(n)
55 tbp=bp.times(n)
56
57 bb=BrownianBridge(b=0, t=10000)
58 sbb=bb.sample(n)
59 tbb=bb.times(n)
60
61 be=BrownianExcursion(t=1)
62 sbe=be.sample(n)
63 tbe=be.times(n)
64
65 bm=BrownianMeander(t=1)
```

```
66 sbm=bm.sample(n)
67 tbm=bm.times(n)
68
69 bmot=BrownianMotion(t=10)
70 sbmot=bmot.sample(n)
71 tbmot=bmot.times(n)
72
73 cp=CauchyProcess(t)
74 scp=cp.sample(n)
75 tcp=cp.times(n)
76
77 fbm=FractionalBrownianMotion(hurst=0.75,t=10000)
78 sfbm=fbm.sample(n)
79 tfbm=fbm.times(n)
80 #tfbm=np.delete(tfbm,np.s_[1])
81
82 gp=GammaProcess(rate=1, scale=50)
83 sgp=gp.sample(n)
84 tgp=gp.times(n)
85
86 gbm=GeometricBrownianMotion(drift=1, volatility=1)
87 sgbm=gbm.sample(n)
88 tgbm=gbm.times(n)
89
90 igp=InverseGaussianProcess(scale=2)
91 sigp=igp.sample(n)
92 tigp=igp.times(n)
93
94 #mpp=MixedPoissonProcess(rate_func=lambda x:5,rate_args=lambda x:(5,5))
95 #smpp=mpp.sample(n)
96 #tmpp=mpp.times(n)
97
98 #mfbm=MultifractionalBrownianMotion(hurst=lambda x:0.5*abs(math.sin(20*t
```

```
   )),t=1)
99 #smfbm=mfbm.sample(n)
100 #tmfbm=mfbm.times(n)
101
102 #pp=PoissonProcess(rate=lambda a : a )
103 #spp=pp.sample(n)
104 #tpp=pp.times(n)
105
106 sb=SquaredBesselProcess(dim=2)
107 ssb=sb.sample(n)
108 tsb=sb.times(n)
109
110 vg=VarianceGammaProcess(drift=0, variance=1, scale=1, t=10000)
111 svg=vg.sample(n)
112 tvg=vg.times(n)
113
114 wp=WienerProcess(t)
115 swp=wp.sample(n)
116 twp=wp.times(n)
117
118 ##### MultiFractional Brownian Motion a trav s de la librer a fbm
119
120 # Example Hurst function with respect to time.
121 def h(t):
122     return 0.25 * math.sin(20*t) + 0.5
123
124 m = MBM(n=10000, hurst=h, length=1, method='riemannliouville')
125 # or
126 #m = MBM(1024, h)
127
128 # Generate a mBm realization
129 smb = m.mbm()
130
```

```
131 # Get the times associated with the mBm
132 tmbm = m.times()
133
134 #####
135
136
137 BP = thinkdsp.Wave(sbp, tbp)
138 BPspectrum = BP.make_spectrum()
139 BP.write(filename='BesselProcess.wav')
140
141 BB = thinkdsp.Wave(sbb, tbb)
142 BBSpectrum = BB.make_spectrum()
143 BB.write(filename='BrownianBridge.wav')
144
145 BE = thinkdsp.Wave(sbe, tbe)
146 BESpectrum = BE.make_spectrum()
147 BE.write(filename='BrownianExcursion.wav')
148
149 BM = thinkdsp.Wave(sbm, tbm)
150 BMSpectrum = BM.make_spectrum()
151 BM.write(filename='BrownianMeander.wav')
152
153 BMot = thinkdsp.Wave(sbmot, tbmot)
154 BMotspectrum = BMot.make_spectrum()
155 BMot.write(filename='BrownianMotion.wav')
156
157 CP = thinkdsp.Wave(scp, tcp)
158 CPSpectrum = CP.make_spectrum()
159 CP.write(filename='CauchyProcess.wav')
160
161 FBM = thinkdsp.Wave(sfbm, tfbm)
162 FBMSpectrum = FBM.make_spectrum()
163 FBM.write(filename='FractionalBrownianMotion.wav')
```

```
164
165 GP = thinkdsp.Wave(sgp, tgp)
166 GPspectrum = GP.make_spectrum()
167 GP.write(filename='GammaProcess.wav')
168
169 GBM = thinkdsp.Wave(sgbm, tgbm)
170 GBMspectrum = GBM.make_spectrum()
171 GBM.write(filename='GeometricBrownianMotion.wav')
172
173 IGP = thinkdsp.Wave(sigp, tigp)
174 IGPspectrum = IGP.make_spectrum()
175 IGP.write(filename='InverseGaussianProcess.wav')
176
177 #MFBM = thinkdsp.Wave(smfbm, tmfbm)
178 #MFBMspectrum = MFBM.make_spectrum()
179 #MFBM.write(filename='MultiFractionalBrownianMotion.wav')
180
181 #PP = thinkdsp.Wave(spp, tpp)
182 #PPspectrum = PP.make_spectrum()
183 #PP.write(filename='PoissonProcess.wav')
184
185 SBP = thinkdsp.Wave(ssb, tsb)
186 SBPspectrum = SBP.make_spectrum()
187 SBP.write(filename='SquaredBesselProcess.wav')
188
189 VGP = thinkdsp.Wave(svg, tvg)
190 VGPspectrum = VGP.make_spectrum()
191 VGP.write(filename='VarianceGammaProcess.wav')
192
193 WP = thinkdsp.Wave(swp, twp)
194 WPspectrum = WP.make_spectrum()
195 WP.write(filename='WienerProcess.wav')
196
```

```
197 MBM = thinkdsp.Wave(smbm,tmbm)
198 MBMspectrum = MBM.make_spectrum()
199 MBM.write(filename='MultiFractionalBrownianMotion.wav')
200
201 ##### Slope Espectro
202
203 slopeBP = BPspectrum.estimate_slope().slope
204
205 slopeBB = BBSpectrum.estimate_slope().slope
206
207 slopeBE = BESpectrum.estimate_slope().slope
208
209 slopeBM = BMSpectrum.estimate_slope().slope
210
211 slopeBMot = BMotspectrum.estimate_slope().slope
212
213 slopeCP = CPSpectrum.estimate_slope().slope
214
215 slopeFBM = FBMspectrum.estimate_slope().slope
216
217 slopeGP = GPspectrum.estimate_slope().slope
218
219 slopeGBM = GBMspectrum.estimate_slope().slope
220
221 slopeIGP = IGPpectrum.estimate_slope().slope
222
223 #slopeMFBM = MFBMspectrum.estimate_slope().slope
224
225 #slopePP = PPspectrum.estimate_slope().slope
226
227 slopeSBP = SBPspectrum.estimate_slope().slope
228
229 slopeVGP = VGPspectrum.estimate_slope().slope
```

```
230
231 slopeWP = WPspectrum.estimate_slope().slope
232
233 slopeMBM = MBMspectrum.estimate_slope().slope
234
235 print('Slopes:')
236 print('BP',slopeBP)
237 print('BB',slopeBB)
238 print('BE',slopeBE)
239 print('BM',slopeBM)
240 print('BMot',slopeBMot)
241 print('CP',slopeCP)
242 print('FBM',slopeFBM)
243 print('GP',slopeGP)
244 print('GBM',slopeGBM)
245 print('IGP',slopeIGP)
246 #print('MFBM',slopeMFBM)
247 #print('PP',slopePP)
248 print('SBP',slopeSBP)
249 print('VGP',slopeVGP)
250 print('WP',slopeWP)
251 print('MBM',slopeMBM)
252
253 ##### Plot Se al
254
255 plt.plot(BP.ts,BP.ys)
256 plt.legend(['Bessel Process'])
257 plt.show()
258
259 plt.plot(BB.ts,BB.ys)
260 plt.legend(['Brownian Bridge'])
261 plt.show()
262
```

```
263 plt.plot(BE.ts, BE.ys)
264 plt.legend(['Brownian Excursion'])
265 plt.show()
266
267 plt.plot(BM.ts, BM.ys)
268 plt.legend(['Brownian Meander'])
269 plt.show()
270
271 plt.plot(BMot.ts, BMot.ys)
272 plt.legend(['Brownian Motion'])
273 plt.show()
274
275 plt.plot(CP.ts, CP.ys)
276 plt.legend(['Cauchy Process'])
277 plt.show()
278
279 plt.plot(FBM.ts, FBM.ys)
280 plt.legend(['Fractional Brownian Motion'])
281 plt.show()
282
283 plt.plot(GP.ts, GP.ys)
284 plt.legend(['Gamma Process'])
285 plt.show()
286
287 plt.plot(GBM.ts, GBM.ys)
288 plt.legend(['Geometrical Brownian Motion'])
289 plt.show()
290
291 plt.plot(IGP.ts, IGP.ys)
292 plt.legend(['Inverse Gaussian Process'])
293 plt.show()
294
295 #plt.plot(MFBM.ts, MFBM.ys)
```

```
296 #plt.legend(['Multi Fractional Brownian Motion'])
297 #plt.show()
298
299 #plt.plot(PP.ts,PP.ys)
300 #plt.legend(['Poisson Process'])
301 #plt.show()
302
303 plt.plot(SBP.ts,SBP.ys)
304 plt.legend(['Squared Bessel Process'])
305 plt.show()
306
307 plt.plot(VGP.ts,VGP.ys)
308 plt.legend(['Variance Gamma Process'])
309 plt.show()
310
311 plt.plot(WP.ts,WP.ys)
312 plt.legend(['Wiener Process'])
313 plt.show()
314
315 plt.plot(MBM.ts,MBM.ys)
316 plt.legend(['Multi Fractional Brownian Motion'])
317 plt.show()
318
319 ##### Plot Espectro
320
321 BPspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta BP',slopeBP))
322 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
323                  xscale='log',yscale='log',low=0)
324 plt.show()
325
326 BBSpectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta BB',slopeBB))
327 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
328                  xscale='log',yscale='log',low=0)
```

```
329 plt.show()
330
331 BESpectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta BE', slopeBE))
332 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
333                  xscale='log', yscale='log', low=0)
334 plt.show()
335
336 BMSpectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta BM', slopeBM))
337 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
338                  xscale='log', yscale='log', low=0)
339 plt.show()
340
341 BMotspectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta BMot', slopeBMot))
342 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
343                  xscale='log', yscale='log', low=0)
344 plt.show()
345
346 CPSpectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta CP', slopeCP))
347 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
348                  xscale='log', yscale='log', low=0)
349 plt.show()
350
351 FBMSpectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta FBM', slopeFBM))
352 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
353                  xscale='log', yscale='log', low=0)
354 plt.show()
355
356 GPSpectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta GP', slopeGP))
357 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
358                  xscale='log', yscale='log', low=0)
359 plt.show()
360
361 GBMSpectrum.plot_power(linewidth=.75, label=('beta GBM', slopeGBM))
```

```
362 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
363                 xscale='log',yscale='log',low=0)
364 plt.show()
365
366 IGPSpectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta IGP',slopeIGP))
367 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
368                 xscale='log',yscale='log',low=0)
369 plt.show()
370
371 #MFBMspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta MFBM',slopeMFBM))
372 #thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
373 #                 xscale='log',yscale='log',low=0)
374 #plt.show()
375
376 #PPSpectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta PP',slopePP))
377 #thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
378 #                 xscale='log',yscale='log',low=0)
379 #plt.show()
380
381 SBPSpectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta SBP',slopeSBP))
382 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
383                 xscale='log',yscale='log',low=0)
384 plt.show()
385
386 VGPSpectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta VGP',slopeVGP))
387 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
388                 xscale='log',yscale='log',low=0)
389 plt.show()
390
391 WPSpectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta WP',slopeWP))
392 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
393                 xscale='log',yscale='log',low=0)
394 plt.show()
```

```
395
396 MBMspectrum.plot_power(linewidth=.75,label=('beta MBM',slopeMBM))
397 thinkplot.config(xlabel='Frequency (1/s)', ylabel='Power',
398                 xscale='log',yscale='log',low=0)
399 plt.show()
```

## A.3. Complexity Interpolator

### Nsynth Algoritmo

```
|
1 import os
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from IPython.display import Audio
5 %matplotlib inline
6
7 from google.colab import files
8 from magenta.models.nsynth import utils
9 from magenta.models.nsynth.wavenet import fastgen
10 from magenta.music.notebook_utils import colab_play as play
11
12 def upload(sample_length, sr):
13     '''Upload a .wav file.'''
14     filemap = files.upload()
15     file_list, audio_list = [], []
16     for key, value in filemap.iteritems():
17         fname = os.path.join('/content/', key)
18         with open(fname, 'w') as f:
19             f.write(value)
20         audio = utils.load_audio(fname, sample_length=sample_length, sr=sr)
21         file_list.append(fname)
22         audio_list.append(audio)
```

```
23     return file_list, audio_list
24
25 download = files.download
26
27 get_name = lambda f: os.path.splitext(os.path.basename(f))[0]
28
29 print('Success!! Environment is now setup.')
30
31 #@title Choose a Model { vertical-output: true, run: "auto" }
32 Model = "Instruments" #@param ["Instruments", "Voices"] {type:"string"}
33 ckpts = {'Instruments': '/content/wavenet-ckpt/model.ckpt-200000',
34         'Voices': '/content/wavenet-voice-ckpt/model.ckpt-200000'}
35
36 ckpt_path = ckpts[Model]
37 print('Using model pretrained on %s.' % Model)
38
39 #@title Set Sound Length (in Seconds) { vertical-output: true, run: "
40     auto" }
41 Length = 2.0 #@param {type:"number"}
42 SR = 16000
43 SAMPLE_LENGTH = int(SR * Length)
44
45 #@title Upload sound files (.wav, .mp3)
46
47 try:
48     file_list, audio_list = upload(sample_length=SAMPLE_LENGTH, sr=SR)
49     names = [get_name(f) for f in file_list]
50     # Pad and peak normalize
51     for i in range(len(audio_list)):
52         audio_list[i] = audio_list[i] / np.abs(audio_list[i]).max()
53
54     if len(audio_list[i]) < SAMPLE_LENGTH:
55         padding = SAMPLE_LENGTH - len(audio_list[i])
```

```
55     audio_list[i] = np.pad(audio_list[i], (0, padding), 'constant')
56
57     audio_list = np.array(audio_list)
58 except Exception as e:
59     print('Upload Cancelled')
60     print(e)
61
62     #@title Generate Encodings
63 audio = np.array(audio_list)
64 z = fastgen.encode(audio, ckpt_path, SAMPLE_LENGTH)
65 print('Encoded %d files' % z.shape[0])
66
67
68 # Start with reconstructions
69 z_list = [z_ for z_ in z]
70 name_list = ['recon_' + name_ for name_ in names]
71
72 # Add all the mean interpolations
73 n = len(names)
74 for i in range(n - 1):
75     for j in range(i + 1, n):
76         new_z = (z[i] + z[j]) / 2.0
77         new_name = 'interp_' + names[i] + '_X_' + names[j]
78         z_list.append(new_z)
79         name_list.append(new_name)
80
81 print("%d total: %d reconstructions and %d interpolations" % (len(
82     name_list), n, len(name_list) - n))
83
84 #@title Visualize Audio and Encoding { vertical-output: true, run: "auto
85     " }
86 SoundFile = 0 #@param {type:"slider", min:0, max:10, step:1}
87 file_number = SoundFile
```

```
86
87 try:
88     print(names[file_number])
89     play(audio_list[file_number], sample_rate=SR)
90     # fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 10))
91     plt.figure()
92     plt.plot(audio_list[file_number])
93     plt.title('Audio Signal')
94
95     plt.figure()
96     plt.plot(z_list[file_number])
97     plt.title('NSynth Encoding')
98 except Exception as e:
99     print e
100
101 #@title Synthesize Interpolations
102 print('Total Iterations to Complete: %d\n' % SAMPLE_LENGTH)
103
104 encodings = np.array(z_list)
105 save_paths = ['/content/' + name + '.wav' for name in name_list]
106 fastgen.synthesize(encodings,
107                    save_paths=save_paths,
108                    checkpoint_path=ckpt_path,
109                    samples_per_save=int(SAMPLE_LENGTH / 10))
110
111 #@title Download Interpolations
112 for fname in save_paths:
113     print('Downloading: %s' % fname.split('/')[-1])
114     download(fname)
```

## Voss Dice Algorithm segun Gardner

```
1 #!/usr/bin/env python3
```

```
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4 Created on Mon Jul 29 23:36:09 2019
5
6 Algoritmo de Voss para ruido rosa utilizando 8 dados
7
8 @author: carlestapi
9 """
10
11 import numpy as np
12 import matplotlib.pyplot as plt
13
14 midiC3=48
15
16 from random import randint
17
18
19 numDice,biasDie,listDice,listPink=8,3.5,[0,0,0,0,0,0,0,0],[midiC3]
20
21 tonalInt,indexRange=[-12,-10,-8,-5,-3,-1,0,2,4,5,7,9,11,12],96
22
23 def rollDie():
24     return randint(1,6)-biasDie
25
26
27
28
29 def voss(index): #establecer que dado tirar
30     listDice[0]=rollDie()
31     if index%2==0:listDice[1]=rollDie()
32     if index%4==0:listDice[2]=rollDie()
33     if index%8==0:listDice[3]=rollDie()
34     if index%16==0:listDice[4]=rollDie()
```

```

35     if index%32==0:listDice [5]=rollDie()
36     if index%64==0:listDice [6]=rollDie()
37     if index%128==0:listDice [7]=rollDie()
38     return listDice
39
40
41
42 def pinkNoise(listPink):
43     pink=0
44
45 #mapeo sobre el numero requerido de notas
46
47     for index in range (indexRange):
48         pink=int(sum(voss(index)))
49
50         while pink not in tonalInt: #filtrar intervalos no tonales
51             pink=int(sum(voss(index)))
52         listPink.append(pink+midiC3)
53     listPink.append(midiC3)
54     return listPink
55
56 print(pinkNoise(listPink))
57 plt.plot(listPink,'bo')
58 plt.show()

```

## MusicVAE Algorithm

```

1 #@title Setup Environment
2 #@test {"output": "ignore"}
3
4 import glob
5
6 print 'Copying checkpoints and example MIDI from GCS. This will take a
    few minutes...'

```

```
7 !gsutil -q -m cp -R gs://download.magenta.tensorflow.org/models/
  music_vae/colab2/* /content/
8
9 print 'Installing dependencies...'
10 !apt-get update -qq && apt-get install -qq libfluidsynth1 fluid-
  soundfont-gm build-essential libasound2-dev libjack-dev
11 !pip install -q pyfluidsynth
12 !pip install -qU magenta
13
14 # Hack to allow python to pick up the newly-installed fluidsynth lib.
15 # This is only needed for the hosted Colab environment.
16 import ctypes.util
17 orig_ctypes_util_find_library = ctypes.util.find_library
18 def proxy_find_library(lib):
19     if lib == 'fluidsynth':
20         return 'libfluidsynth.so.1'
21     else:
22         return orig_ctypes_util_find_library(lib)
23 ctypes.util.find_library = proxy_find_library
24
25
26 print 'Importing libraries and defining some helper functions...'
27 from google.colab import files
28 import magenta.music as mm
29 from magenta.models.music_vae import configs
30 from magenta.models.music_vae.trained_model import TrainedModel
31 import numpy as np
32 import os
33 import tensorflow as tf
34
35 # Necessary until pyfluidsynth is updated (>1.2.5).
36 import warnings
37 warnings.filterwarnings("ignore", category=DeprecationWarning)
```

```
38
39 def play(note_sequence):
40     mm.play_sequence(note_sequence, synth=mm.fluidsynth)
41
42 def interpolate(model, start_seq, end_seq, num_steps, max_length=32,
43               assert_same_length=True, temperature=0.5,
44               individual_duration=4.0):
45     """Interpolates between a start and end sequence."""
46     note_sequences = model.interpolate(
47         start_seq, end_seq, num_steps=num_steps, length=max_length,
48         temperature=temperature,
49         assert_same_length=assert_same_length)
50
51     print 'Start Seq Reconstruction'
52     play(note_sequences[0])
53     print 'End Seq Reconstruction'
54     play(note_sequences[-1])
55     print 'Mean Sequence'
56     play(note_sequences[num_steps // 2])
57     print 'Start -> End Interpolation'
58     interp_seq = mm.sequences_lib.concatenate_sequences(
59         note_sequences, [individual_duration] * len(note_sequences))
60     play(interp_seq)
61     mm.plot_sequence(interp_seq)
62     return interp_seq if num_steps > 3 else note_sequences[num_steps // 2]
63
64 def download(note_sequence, filename):
65     mm.sequence_proto_to_midi_file(note_sequence, filename)
66     files.download(filename)
67
68 print 'Done'
69
70 #@title Load the pre-trained model.
```

```
71 mel_2bar_config = configs.CONFIG_MAP['cat-mel_2bar_big']
72 mel_2bar = TrainedModel(mel_2bar_config, batch_size=4,
    checkpoint_dir_or_path='/content/checkpoints/mel_2bar_big.ckpt')
73
74 #@title Option 2: Upload your own MIDI files to use for interpolation
    endpoints instead of those provided.
75 input_mel_midi_data = files.upload().values() or input_mel_midi_data
76
77 #@title Extract melodies from MIDI files. This will extract all unique
    2-bar melodies using a sliding window with a stride of 1 bar.
78 mel_input_seqs = [mm.midi_to_sequence_proto(m) for m in
    input_mel_midi_data]
79 extracted_mels = []
80 for ns in mel_input_seqs:
81     extracted_mels.extend(
82         mel_2bar_config.data_converter.to_notesequences(
83             mel_2bar_config.data_converter.to_tensors(ns)[1]))
84 for i, ns in enumerate(extracted_mels):
85     print "Melody", i
86     play(ns)
87
88 #@title Interpolate between 2 melodies, selected from those in the
    previous cell.
89 start_melody = 0 #@param {type:"integer"}
90 end_melody = 6 #@param {type:"integer"}
91 start_mel = extracted_mels[start_melody]
92 end_mel = extracted_mels[end_melody]
93
94 temperature = 0.5 #@param {type:"slider", min:0.1, max:1.5, step:0.1}
95 num_steps = 13 #@param {type:"integer"}
96
97 mel_2bar_interp = interpolate(mel_2bar, start_mel, end_mel, num_steps=
    num_steps, temperature=temperature)
```

# Apéndice B

## Anexo Capítulo 2

Conjuntamente al desarrollo tecnológico dentro de las ciencias de la información también se han desarrollado sus fundamentos conceptuales, en lo que refiere a las definiciones matemáticas, lógicas y respecto a las estructuras algorítmicas a partir de las cuales se define lo que es la “computación” [136]. De igual manera también se ha estudiado dentro del campo de estudio de la filosofía, la física y la informática lo que constituye el concepto de información [? ].

En este punto, más allá de los estudios anteriores, intentaremos abordar de una manera sistemática cuando un sistema físico computa, y particularmente, bajo que condiciones podemos decir que un sistema biológico realiza una computación.

### B.1. Teoría AR

Para abordar la pregunta anterior partiremos de la teoría AR [? ], la cual se introdujo inicialmente para caracterizar de una manera formal la relación entre las representaciones abstractas y los sistemas físicos para determinar así cuando un sistema físico está siendo usado como un sistema de computo [101]. Así de esta manera podemos diferenciar el caso cuando un substrato está específicamente computando opuestamente a cuando está meramente acarreado un determinado proceso físico en dicho substrato.

Dentro de la teoría AR se puede definir la ciencia, la ingeniería y la computación como una forma de actividad representacional, requiriendo el uso de una “relación de representación” para poder unir un sistema físico y un modelo abstracto y así poder definir su operación. De esta manera podemos utilizar la teoría AR para distinguir entre la experimentación científica en un substrato novedoso y el desarrollo de cierta computación en ese substrato.

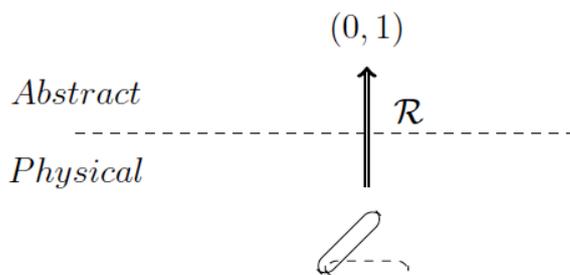
En el núcleo de la teoría AR se encuentra la *relación de representación*  $\mathcal{R}$ , la cual mapea objetos físicos determinados a objetos abstractos. La ciencia experimental, la ingeniería y la computación requieren de un entrelazamiento entre objetos físicos y abstractos a través de una representación de tal manera que sus diagramas descriptivos conmuten pudiendo llegar al mismo resultado a partir de las evoluciones abstractas o bien a partir de las evoluciones del sistema físico en si. En base a esto Horsman et. al. [101] definen la computación de manera general como *el uso de un sistema físico para predecir la salida de una evolución abstracta*.

## B.2. Representación

La teoría AR dispone de objetos físicos dentro del dominio de los sistemas materiales, de objetos abstractos (incluyendo entidades matemáticas y lógicas) y de relaciones de representación que median entre las dos. La distinción entre estos dos espacios es fundamental ya que su conexión solo se genera a través de la direccionalidad de la relación de representación.

Un ejemplo intuitivo se puede observar en la figura B.1 en la cual un sistema físico tipo *switch* se representa abstractamente como un bit, el cual toma el valor 0 cuando el *switch* está hacia arriba y el valor 1 cuando el *switch* está hacia abajo. De esta manera un ejemplo de un objeto físico en el dominio de entidades materiales puede ser un computador. Éste normalmente posee grados de libertad internos y una evolución física del tiempo que transforma un input inicial a un output de estado finales. Un ejemplo de objeto abstracto

es una computación, la cual es un conjunto de objetos y relaciones descritas en uno de los formalismos lógicos pertenecientes a la teoría de las ciencias de la computación.



**Figura B.1:** Diagrama de representación. La representación básica tiene 3 componentes: (i) el espacio de los objetos físicos, (ii) el espacio de los objetos abstractos, (iii) la relación de representación  $\mathcal{R}$  mediando entre los dos espacios.

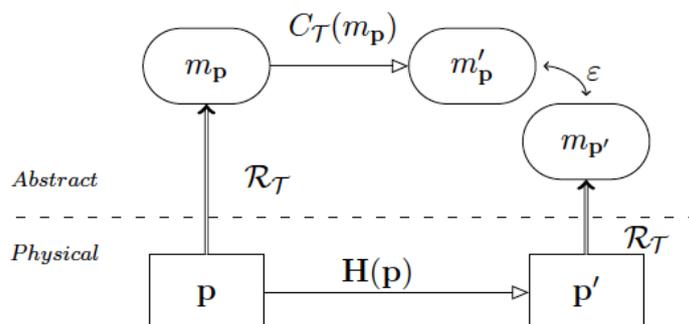
El rol central de la representación conlleva irreductiblemente al requerimiento de una *entidad representacional* (RE). Esta RE define ontológicamente la *relación de representación* entre lo físico y lo abstracto. Es importante especificar que la teoría AR no requiere que la RE sea de carácter humano o bien consciente, como por ejemplo en el caso de una bacteria, como se verá en la sección \*.

La *relación de representación* más elemental es el mapeo directo entre los objetos físicos y los objetos abstractos,  $\mathcal{R}_{\mathcal{T}} = \mathbf{p} \rightarrow m_{\mathbf{p}}$ , donde  $\mathbf{p}$  es un conjunto de objetos físicos y  $m_{\mathbf{p}}$  es un conjunto de objetos abstractos. El subíndice  $\mathcal{T}$  en  $\mathcal{R}$  indica que la relación depende de una teoría específica.

La evolución abstracta mapea de objetos abstractos a objetos abstractos a partir de una dinámica  $\mathcal{C}_{\mathcal{T}} : m_{\mathbf{p}} \rightarrow m'_{\mathbf{p}}$ . La correspondiente evolución física de  $\mathbf{p}$  la escribimos como  $\mathbf{H} : \mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}'$ .

Para poder unir los objetos abstractos y físicos finales aplicamos la relación de representación al estado de salida correspondiente a la evolución física para darle una representación abstracta  $m_{\mathbf{p}'}$ . Esto nos da finalmente dos objetos abstractos:  $m'_{\mathbf{p}}$ , correspondiente a la evolución abstracta y  $m_{\mathbf{p}'}$ , correspondiente a la evolución física. En el caso que  $m'_{\mathbf{p}} - m_{\mathbf{p}'} \leq \epsilon$  entonces decimos que el diagrama conmuta, como podemos observar en la

figura B.2.



**Figura B.2:** Diagrama de conmutación.

Encontrar cuales son los diagramas que conmutan es la finalidad de las ciencias experimentales, así una vez se establece que diagramas conmutan éstos se pueden utilizar a través de la ingeniería y la tecnología.

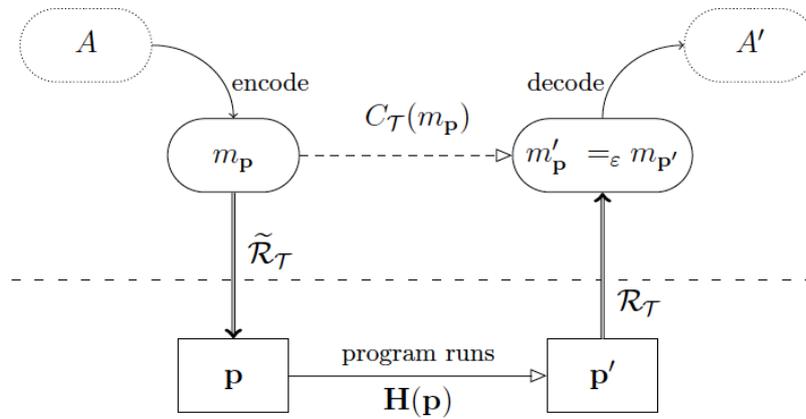
### B.3. Ciclo de Computación

Dentro del caso específico de la computación, un diagrama que conmuta también conecta el dispositivo de computo físico  $\mathbf{p}$  con su representación abstracta  $m_{\mathbf{p}}$ . En este caso para hacerlo utiliza la *relación de instanciación*  $\tilde{\mathcal{R}}_{\mathcal{T}} : m_{\mathbf{p}} \rightarrow \mathbf{p}$ .

El uso de  $\tilde{\mathcal{R}}_{\mathcal{T}}$  toma en cuenta que un computador es un sistema físico ingenierizado para que tengo un comportamiento particular, al contrario de un sistema físico natural modelado científicamente.

El ciclo de computo se muestra en la figura B.3 y parte de un problema abstracto el cual se instancia en un computador físico. La evolución física del dispositivo seguido de la representación del estado físico final resulta en la respuesta abstracta del problema en cuestión.

El uso más importante de un sistema de computo es cuando el output abstracto  $m'_{\mathbf{p}}$  es desconocido, i.e. cuando se utilizan los computadores para resolver problemas. Un ejemplo



**Figura B.3:** Diagrama ciclo de computación.

en este caso puede ser el uso de un computador para realizar el calculo aritmético abstracto  $2 + 2$ . Si se desconoce la salida y se utiliza el dispositivo de cómputo para computarla entonces el estado abstracto final  $m'_{\mathbf{p}} = 4$  no se calcula abstractamente y, en vez de ello, la confianza en las capacidades tecnológicas del computador y la instanciación correcta permite alcanzar el output final abstracto  $m'_{\mathbf{p}} = m_{\mathbf{p}}$ , a partir tan solo de la evolución física del dispositivo (con un error  $\epsilon = 0$  en el caso de un computador digital).

# Apéndice C

## Anexo Capítulo 3

### C.1. Emisiones Acústicas - Correlación Cruzada Entre Días, (T-test)

```
1 #!/usr/bin/env python2
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4 Created on Sun Apr 14 13:47:00 2019
5
6 @author: carlestapi
7 """
8
9 from scipy import signal
10 from scipy import stats
11
12 import matplotlib.pyplot as plt
13 plt.style.use('default')
14 import numpy as np
15
16 import pandas as pd
17 from pandas.tools.plotting import andrews_curves
```



```
    cultivo2SCRN0297.TXT', header=2, names=names)
44 s1cultivo21 = df.s1cultivo21.values
45 ##### Dia 1 Cultivo 2 MIC
46 names = ['f2cultivo2', 's2cultivo21']
47 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/8abril:espectro/
    cultivo2SCRN0296.TXT', header=2, names=names)
48 s2cultivo21 = df.s2cultivo21.values
49 ##### Dia 1 Cultivo 3 ACC
50 names = ['f1cultivo3', 's1cultivo31']
51 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/8abril:espectro/
    cultivo3SCRN0301.TXT', header=2, names=names)
52 s1cultivo31 = df.s1cultivo31.values
53 ##### Dia 1 Cultivo 3 MIC
54 names = ['f2cultivo3', 's2cultivo31']
55 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/8abril:espectro/
    cultivo3SCRN0300.TXT', header=2, names=names)
56 s2cultivo31 = df.s2cultivo31.values
57 ##### Dia 1 Cultivo 4 ACC
58 names = ['f1cultivo4', 's1cultivo41']
59 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/8abril:espectro/
    cultivo4SCRN0305.TXT', header=2, names=names)
60 s1cultivo41 = df.s1cultivo41.values
61 ##### Dia 1 Cultivo 4 MIC
62 names = ['f2cultivo4', 's2cultivo41']
63 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/8abril:espectro/
    cultivo4SCRN0304.TXT', header=2, names=names)
64 s2cultivo41 = df.s2cultivo41.values
65 ##### Dia 1 Cultivo 5 ACC
66 names = ['f1cultivo5', 's1cultivo51']
67 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/8abril:espectro/
    cultivo5SCRN0309.TXT', header=2, names=names)
68 s1cultivo51 = df.s1cultivo51.values
69 ##### Dia 1 Cultivo 5 MIC
```



```
95 ##### Dia 2 Calibraci n ACC
96 names = ['frequency1', 'caliacc2']
97 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    calibracion1SCRN0327.TXT', header=2, names=names)
98 caliacc2 = df.caliacc2.values
99 ##### Dia 2 Calibraci n MIC
100 names = ['frequency2', 'calimic2']
101 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    calibracion1SCRN0326.TXT', header=2, names=names)
102 calimic2 = df.calimic2.values
103 ##### Dia 2 Cultivo 1 ACC
104 names = ['f1cultivo1', 's1cultivo12']
105 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo1SCRN0322.TXT', header=2, names=names)
106 s1cultivo12 = df.s1cultivo12.values
107 ##### Dia 2 Cultivo 1 MIC
108 names = ['f2cultivo1', 's2cultivo12']
109 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo1SCRN0321.TXT', header=2, names=names)
110 s2cultivo12 = df.s2cultivo12.values
111 ##### Dia 2 Cultivo 2 ACC
112 names = ['f1cultivo2', 's1cultivo22']
113 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo2SCRN0331.TXT', header=2, names=names)
114 s1cultivo22 = df.s1cultivo22.values
115 ##### Dia 2 Cultivo 2 MIC
116 names = ['f2cultivo2', 's2cultivo22']
117 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo2SCRN0330.TXT', header=2, names=names)
118 s2cultivo22 = df.s2cultivo22.values
119 ##### Dia 2 Cultivo 3 ACC
120 names = ['f1cultivo3', 's1cultivo32']
121 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
```

```
    cultivo3SCRN0335.TXT', header=2, names=names)
122 s1cultivo32 = df.s1cultivo32.values
123 ##### Dia 2 Cultivo 3 MIC
124 names = ['f2cultivo3', 's2cultivo32']
125 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo3SCRN0334.TXT', header=2, names=names)
126 s2cultivo32 = df.s2cultivo32.values
127 ##### Dia 2 Cultivo 4 ACC
128 names = ['f1cultivo4', 's1cultivo42']
129 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo4SCRN0339.TXT', header=2, names=names)
130 s1cultivo42 = df.s1cultivo42.values
131 ##### Dia 2 Cultivo 4 MIC
132 names = ['f2cultivo4', 's2cultivo42']
133 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo4SCRN0338.TXT', header=2, names=names)
134 s2cultivo42 = df.s2cultivo42.values
135 ##### Dia 2 Cultivo 5 ACC
136 names = ['f1cultivo5', 's1cultivo52']
137 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo5SCRN0343.TXT', header=2, names=names)
138 s1cultivo52 = df.s1cultivo52.values
139 ##### Dia 2 Cultivo 5 MIC
140 names = ['f2cultivo5', 's2cultivo52']
141 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo5SCRN0342.TXT', header=2, names=names)
142 s2cultivo52 = df.s2cultivo52.values
143 ##### Dia 2 Cultivo 6 ACC
144 names = ['f1cultivo6', 's1cultivo62']
145 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/9abril:espectro/
    cultivo6SCRN0347.TXT', header=2, names=names)
146 s1cultivo62 = df.s1cultivo62.values
147 ##### Dia 2 Cultivo 6 MIC
```



```
173 freqs2 = df.frequency2.values
174 calimic3 = df.calimic3.values
175 ##### Dia 3 Cultivo 1 ACC
176 names = ['f1cultivo1', 's1cultivo13']
177 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo1SCRN0005.TXT', header=2, names=names)
178 f1cultivo1 = df.f1cultivo1.values
179 s1cultivo13 = df.s1cultivo13.values
180 ##### Dia 3 Cultivo 1 MIC
181 names = ['f2cultivo1', 's2cultivo13']
182 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo1SCRN0004.TXT', header=2, names=names)
183 f2cultivo1 = df.f2cultivo1.values
184 s2cultivo13 = df.s2cultivo13.values
185 ##### Dia 3 Cultivo 2 ACC
186 names = ['f1cultivo2', 's1cultivo23']
187 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo2SCRN0008.TXT', header=2, names=names)
188 f1cultivo2 = df.f1cultivo2.values
189 s1cultivo23 = df.s1cultivo23.values
190 ##### Dia 3 Cultivo 2 MIC
191 names = ['f2cultivo2', 's2cultivo23']
192 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo2SCRN0007.TXT', header=2, names=names)
193 f2cultivo2 = df.f2cultivo2.values
194 s2cultivo23 = df.s2cultivo23.values
195 ##### Dia 3 Cultivo 3 ACC
196 names = ['f1cultivo3', 's1cultivo33']
197 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo3SCRN0011.TXT', header=2, names=names)
198 f1cultivo3 = df.f1cultivo3.values
199 s1cultivo33 = df.s1cultivo33.values
200 ##### Dia 3 Cultivo 3 MIC
```

```
201 names = ['f2cultivo3', 's2cultivo33']
202 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo3SCRN0010.TXT', header=2, names=names)
203 f2cultivo3 = df.f2cultivo3.values
204 s2cultivo33 = df.s2cultivo33.values
205 ##### Dia 3 Cultivo 4 ACC
206 names = ['f1cultivo4', 's1cultivo43']
207 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo4SCRN0014.TXT', header=2, names=names)
208 f1cultivo4 = df.f1cultivo4.values
209 s1cultivo43 = df.s1cultivo43.values
210 ##### Dia 3 Cultivo 4 MIC
211 names = ['f2cultivo4', 's2cultivo43']
212 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo4SCRN0013.TXT', header=2, names=names)
213 f2cultivo4 = df.f2cultivo4.values
214 s2cultivo43 = df.s2cultivo43.values
215 ##### Dia 3 Cultivo 5 ACC
216 names = ['f1cultivo5', 's1cultivo53']
217 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo5SCRN0017.TXT', header=2, names=names)
218 f1cultivo5 = df.f1cultivo5.values
219 s1cultivo53 = df.s1cultivo53.values
220 ##### Dia 3 Cultivo 5 MIC
221 names = ['f2cultivo5', 's2cultivo53']
222 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo5SCRN0016.TXT', header=2, names=names)
223 f2cultivo5 = df.f2cultivo5.values
224 s2cultivo53 = df.s2cultivo53.values
225 ##### Dia 3 Cultivo 6 ACC
226 names = ['f1cultivo6', 's1cultivo63']
227 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/10abril:espectro/
    cultivo6SCRN0020.TXT', header=2, names=names)
```



```
254 freqs1 = df.frequency1.values
255 caliacc4 = df.caliacc4.values
256 ##### Dia 4 Calibraci n MIC
257 names = ['frequency2', 'calimic4']
258 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    calibracionSCRN0025.TXT', header=2, names=names)
259 freqs2 = df.frequency2.values
260 calimic4 = df.calimic4.values
261 ##### Dia 4 Cultivo 1 ACC
262 names = ['f1cultivo1', 's1cultivo14']
263 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo1SCRN0029.TXT', header=2, names=names)
264 f1cultivo1 = df.f1cultivo1.values
265 s1cultivo14 = df.s1cultivo14.values
266 ##### Dia 4 Cultivo 1 MIC
267 names = ['f2cultivo1', 's2cultivo14']
268 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo1SCRN0028.TXT', header=2, names=names)
269 f2cultivo1 = df.f2cultivo1.values
270 s2cultivo14 = df.s2cultivo14.values
271 ##### Dia 4 Cultivo 2 ACC
272 names = ['f1cultivo2', 's1cultivo24']
273 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo2SCRN0032.TXT', header=2, names=names)
274 f1cultivo2 = df.f1cultivo2.values
275 s1cultivo24 = df.s1cultivo24.values
276 ##### Dia 4 Cultivo 2 MIC
277 names = ['f2cultivo2', 's2cultivo24']
278 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo2SCRN0031.TXT', header=2, names=names)
279 f2cultivo2 = df.f2cultivo2.values
280 s2cultivo24 = df.s2cultivo24.values
281 ##### Dia 4 Cultivo 3 ACC
```

```
282 names = ['f1cultivo3', 's1cultivo34']
283 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo3SCRN0035.TXT', header=2, names=names)
284 f1cultivo3 = df.f1cultivo3.values
285 s1cultivo34 = df.s1cultivo34.values
286 ##### Dia 4 Cultivo 3 MIC
287 names = ['f2cultivo3', 's2cultivo34']
288 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo3SCRN0034.TXT', header=2, names=names)
289 f2cultivo3 = df.f2cultivo3.values
290 s2cultivo34 = df.s2cultivo34.values
291 ##### Dia 4 Cultivo 4 ACC
292 names = ['f1cultivo4', 's1cultivo44']
293 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo4SCRN0038.TXT', header=2, names=names)
294 f1cultivo4 = df.f1cultivo4.values
295 s1cultivo44 = df.s1cultivo44.values
296 ##### Dia 4 Cultivo 4 MIC
297 names = ['f2cultivo4', 's2cultivo44']
298 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo4SCRN0037.TXT', header=2, names=names)
299 f2cultivo4 = df.f2cultivo4.values
300 s2cultivo44 = df.s2cultivo44.values
301 ##### Dia 4 Cultivo 5 ACC
302 names = ['f1cultivo5', 's1cultivo54']
303 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo5SCRN0041.TXT', header=2, names=names)
304 f1cultivo5 = df.f1cultivo5.values
305 s1cultivo54 = df.s1cultivo54.values
306 ##### Dia 4 Cultivo 5 MIC
307 names = ['f2cultivo5', 's2cultivo54']
308 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro/
    cultivo5SCRN0040.TXT', header=2, names=names)
```

```
309 f2cultivo5 = df.f2cultivo5.values
310 s2cultivo54 = df.s2cultivo54.values
311
312 ##### ERROR DE MEDICIN - AGAR CRACKELANDOSE!!!
313 ##### Dia 4 Cultivo 6 ACC
314 #
315 #names = ['f1cultivo6', 's1cultivo6']
316 #df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro
    /cultivo6SCRN0020.TXT', header=2, names=names)
317 #f1cultivo6 = df.f1cultivo6.values
318 #s1cultivo6 = df.s1cultivo6.values
319 #
320 #plt.plot(f1cultivo6,s1cultivo6,label='Acc Cultivo 6 Dia 4')
321 #plt.xscale('log')
322 #plt.yscale('linear')
323 #plt.xlabel('frequency [Hz]')
324 #plt.ylabel('Power Spectra [dBVrms]')
325 #
326 #
327 ##### Dia 4 Cultivo 6 MIC
328 #
329 #names = ['f2cultivo6', 's2cultivo6']
330 #df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/11abril:espectro
    /cultivo6SCRN0019.TXT', header=2, names=names)
331 #f2cultivo6 = df.f2cultivo6.values
332 #s2cultivo6 = df.s2cultivo6.values
333 #
334 #plt.plot(f2cultivo6,s2cultivo6,label='Mic Cultivo 6 Dia 4')
335 #plt.xscale('log')
336 #plt.yscale('linear')
337 #plt.xlabel('frequency [Hz]')
338 #plt.ylabel('Power Spectra [dBVrms]')
339
```





```
398 x12 = calimic2 #calibracion mic
399 x22 = caliac2 #calibracion acc
400
401 y12 = s1cultivo12
402 y22 = s2cultivo12
403 y32 = s1cultivo22
404 y42 = s2cultivo22
405 y52 = s1cultivo32
406 y62 = s2cultivo32
407 y72 = s1cultivo42
408 y82 = s2cultivo42
409 y92 = s1cultivo52
410 y102 = s2cultivo52
411 y112 = s1cultivo62
412 y122 = s2cultivo62
413 y132 = s1cultivo72
414 y142 = s2cultivo72
415
416 a2 = y12-x12
417 b2 = (y22-x22)
418 c2 = y32-x12
419 d2 = (y42-x22)
420 e2 = y52-x12
421 f2 = (y62-x22)
422 g2 = y72-x12
423 h2 = (y82-x22)
424 i2 = y92-x12
425 j2 = (y102-x22)
426 k2 = y112-x12
427 l2 = (y122-x22)
428 m2 = y132-x12
429 n2 = (y142-x22)
430
```





```
491 #y124 = s2cultivo64
492 y134 = s1cultivo74
493 y144 = s2cultivo74
494
495 a4 = y14-x14
496 b4 = (y24-x24)
497 c4 = y34-x14
498 d4 = (y44-x24)
499 e4 = y54-x14
500 #f4 = -(y64-x24)
501 g4 = y74-x14
502 h4 = (y84-x24)
503 i4 = y94-x14
504 j4 = (y104-x24)
505 #k4 = y114-x14
506 #l4 = -(y124-x24)
507 m4 = y134-x14
508 #n4 = -(y144-x24)
509
510 ##### Variancias
511
512 vara= np.var(a)
513 varb= np.var(b)
514 varc= np.var(c)
515 vard= np.var(d)
516 vare= np.var(e)
517 varf= np.var(f)
518 varg= np.var(g)
519 varh= np.var(h)
520 vari= np.var(i)
521 varj= np.var(j)
522 vark= np.var(k)
523 varl= np.var(l)
```

```
524 varm= np.var(m)
525 varn= np.var(n)
526
527
528
529
530
531 ##### PLOTS ###
532 #####
533
534 ##### DIA 1
535
536 plt.plot(a,label='Mic Cultivo 1 Dia 1')
537 plt.plot(b,label='Acc Cultivo 1 Dia 1')
538 plt.plot(c,label='Mic Cultivo 2 Dia 1')
539 plt.plot(d,label='Acc Cultivo 2 Dia 1')
540 plt.plot(e,label='Mic Cultivo 3 Dia 1')
541 plt.plot(f,label='Acc Cultivo 3 Dia 1')
542 plt.plot(g,label='Mic Cultivo 4 Dia 1')
543 plt.plot(h,label='Acc Cultivo 4 Dia 1')
544 plt.plot(i,label='Mic Cultivo 5 Dia 1')
545 plt.plot(j,label='Acc Cultivo 5 Dia 1')
546 plt.plot(k,label='Mic Cultivo 6 Dia 1')
547 plt.plot(l,label='Acc Cultivo 6 Dia 1')
548 plt.plot(m,label='Mic Cultivo 7 Dia 1')
549 plt.plot(n,label='Acc Cultivo 7 Dia 1')
550
551 ##### DIA 2
552
553 plt.plot(a2,label='Mic Cultivo 1 Dia 2')
554 plt.plot(b2,label='Acc Cultivo 1 Dia 2')
555 plt.plot(c2,label='Mic Cultivo 2 Dia 2')
556 plt.plot(d2,label='Acc Cultivo 2 Dia 2')
```

```
557 plt.plot(e2,label='Mic Cultivo 3 Dia 2')
558 plt.plot(f2,label='Acc Cultivo 3 Dia 2')
559 plt.plot(g2,label='Mic Cultivo 4 Dia 2')
560 plt.plot(h2,label='Acc Cultivo 4 Dia 2')
561 plt.plot(i2,label='Mic Cultivo 5 Dia 2')
562 plt.plot(j2,label='Acc Cultivo 5 Dia 2')
563 plt.plot(k2,label='Mic Cultivo 6 Dia 2')
564 plt.plot(l2,label='Acc Cultivo 6 Dia 2')
565 plt.plot(m2,label='Mic Cultivo 7 Dia 2')
566 plt.plot(n2,label='Acc Cultivo 7 Dia 2')
567
568 ##### DIA 3
569
570 plt.plot(a3,label='Mic Cultivo 1 Dia 2')
571 plt.plot(b3,label='Acc Cultivo 1 Dia 2')
572 plt.plot(c3,label='Mic Cultivo 2 Dia 2')
573 plt.plot(d3,label='Acc Cultivo 2 Dia 2')
574 plt.plot(e3,label='Mic Cultivo 3 Dia 2')
575 plt.plot(f3,label='Acc Cultivo 3 Dia 2')
576 plt.plot(g3,label='Mic Cultivo 4 Dia 2')
577 plt.plot(h3,label='Acc Cultivo 4 Dia 2')
578 plt.plot(i3,label='Mic Cultivo 5 Dia 2')
579 plt.plot(j3,label='Acc Cultivo 5 Dia 2')
580 plt.plot(k3,label='Mic Cultivo 6 Dia 2')
581 plt.plot(l3,label='Acc Cultivo 6 Dia 2')
582 plt.plot(m3,label='Mic Cultivo 7 Dia 2')
583 plt.plot(n3,label='Acc Cultivo 7 Dia 2')
584
585 ##### DIA 4
586
587 plt.plot(a4,label='Mic Cultivo 1 Dia 2')
588 plt.plot(b4,label='Acc Cultivo 1 Dia 2')
589 plt.plot(c4,label='Mic Cultivo 2 Dia 2')
```

```
590 plt.plot(d4,label='Acc Cultivo 2 Dia 2')
591 plt.plot(e4,label='Mic Cultivo 3 Dia 2')
592 #plt.plot(f4,label='Acc Cultivo 3 Dia 2')
593 plt.plot(g4,label='Mic Cultivo 4 Dia 2')
594 plt.plot(h4,label='Acc Cultivo 4 Dia 2')
595 plt.plot(i4,label='Mic Cultivo 5 Dia 2')
596 plt.plot(j4,label='Acc Cultivo 5 Dia 2')
597 #plt.plot(k4,label='Mic Cultivo 6 Dia 2')
598 #plt.plot(l4,label='Acc Cultivo 6 Dia 2')
599 plt.plot(m4,label='Mic Cultivo 7 Dia 2')
600 #plt.plot(n4,label='Acc Cultivo 7 Dia 2')
601
602 #####
603
604 ab = a+b
605 cd = c+d
606 ef = e+f
607 gh = g+h
608 ij = i+j
609 kl = k+l
610 mn = m+n
611
612 plt.plot(ab)
613 plt.plot(cd)
614 plt.plot(ef)
615 plt.plot(gh)
616 plt.plot(ij)
617 plt.plot(kl)
618 plt.plot(mn)
619
620 #####
621
622 plt.xscale('linear')
```

```
623 plt.xlabel('Spectral Data Samples')
624 plt.ylabel('Difference [dBVrms]')
625 plt.title('Calibration vs Measurement (Across 4 Days)')
626 #plt.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(1.3, 1), shadow=True,
627           ncol=1)
627 #plt.ylim(-1,2)
628 plt.show()
629
630 ##### Rolling Mean
631
632
633 mab = pd.Series(ab).rolling(50).mean()
634 mcd = pd.Series(cd).rolling(50).mean()
635 mef = pd.Series(ef).rolling(50).mean()
636 mgh = pd.Series(gh).rolling(50).mean()
637 mij = pd.Series(ij).rolling(50).mean()
638 mkl = pd.Series(kl).rolling(50).mean()
639 mmn = pd.Series(mn).rolling(50).mean()
640
641 plt.plot(8*mab.index,mab,label='Culture 1')
642 plt.plot(8*mcd.index,mcd,label='Culture 2')
643 plt.plot(8*mef.index,mef,label='Culture 3')
644 plt.plot(8*mgh.index,mgh,label='Culture 4')
645 plt.plot(8*mij.index,mij,label='Culture 5')
646 plt.plot(8*mkl.index,mkl,label='Culture 6')
647 plt.plot(8*mmn.index,mmn,label='Culture 7')
648
649
650 ##### Rolling Standard Deviation
651
652 sab = pd.Series(ab).rolling(50).std()
653 scd = pd.Series(cd).rolling(50).std()
654 sef = pd.Series(ef).rolling(50).std()
```

```
655 sgh = pd.Series(gh).rolling(50).std()
656 sij = pd.Series(ij).rolling(50).std()
657 skl = pd.Series(kl).rolling(50).std()
658 smn = pd.Series(mn).rolling(50).std()
659
660 plt.fill_between(8*mab.index, mab-2*sab, mab+2*sab,color='grey',alpha
    =0.1,label='Standard Deviation')
661 plt.fill_between(8*mcd.index, mcd-2*scd, mcd+2*scd,color='grey',alpha
    =0.1)
662 plt.fill_between(8*mef.index, mef-2*sef, mef+2*sef,color='grey',alpha
    =0.1)
663 plt.fill_between(8*mgh.index, mgh-2*sgh, mgh+2*sgh,color='grey',alpha
    =0.1)
664 plt.fill_between(8*mij.index, mij-2*sij, mij+2*sij,color='grey',alpha
    =0.1)
665 plt.fill_between(8*mkl.index, mkl-2*skl, mkl+2*skl,color='grey',alpha
    =0.1)
666 plt.fill_between(8*mmn.index, mmn-2*smn, mmn+2*smn,color='grey',alpha
    =0.1)
667
668 plt.xlabel('Frequency Samples [Hz] (log scale)')
669 plt.ylabel('Mean Spectral Power [dBVrms]')
670 plt.title('Mean Acoustic Emission (Across 4 Days, Mic. & Acc.
    Measurements)')
671 plt.xscale('linear')
672 plt.legend()
673
674 plt.show()
675
676
677 ##### T-Test
678
679 #Calibration Across Days
```

```
680
681 meancaliACC=np.mean(np.array([x2,x22,x23,x24]),axis=0)
682
683 plt.plot(freqs2,meancaliACC,'b--')
684
685
686 #Calibration MIC Across Days
687
688 meancaliMIC=np.mean(np.array([x1,x12,x13,x14]),axis=0)
689
690 plt.plot(freqs1,meancaliMIC,'r--')
691
692 #Culture 1 ACC Across Days
693
694 meanculture1ACC=np.mean(np.array([s1cultivo11,s1cultivo12,s1cultivo13,
        s1cultivo14]),axis=0)
695 plt.plot(freqs1,meanculture1ACC)
696
697 #Culture 1 MIC Across Days
698
699 meanculture1MIC=np.mean(np.array([s2cultivo11,s2cultivo12,s2cultivo13,
        s2cultivo14]),axis=0)
700 plt.plot(freqs1,meanculture1MIC)
701
702 #Culture 2 ACC Across Days
703
704 meanculture2ACC=np.mean(np.array([s1cultivo21,s1cultivo22,s1cultivo23,
        s1cultivo24]),axis=0)
705 plt.plot(freqs1,meanculture2ACC)
706
707 #Culture 2 MIC Across Days
708
709 meanculture2MIC=np.mean(np.array([s2cultivo21,s2cultivo22,s2cultivo23,
```

```
    s2cultivo24]),axis=0)
710 plt.plot(freqs1,meanculture2MIC)
711
712 #Culture 3 ACC Across Days
713
714 meanculture3ACC=np.mean(np.array([s1cultivo31,s1cultivo32,s1cultivo33,
    s1cultivo34]),axis=0)
715 plt.plot(freqs1,meanculture3ACC)
716
717 #Culture 3 MIC Across Days (falta cultivo 3 dia 4 mic!!!)
718
719 meanculture3MIC=np.mean(np.array([s2cultivo31,s2cultivo32,s2cultivo33]),
    axis=0)
720 plt.plot(freqs1,meanculture3MIC)
721
722 #Culture 4 ACC Across Days
723
724 meanculture4ACC=np.mean(np.array([s1cultivo41,s1cultivo42,s1cultivo43,
    s1cultivo44]),axis=0)
725 plt.plot(freqs1,meanculture4ACC)
726
727 #Culture 4 MIC Across Days
728
729 meanculture4MIC=np.mean(np.array([s2cultivo41,s2cultivo42,s2cultivo43,
    s2cultivo43]),axis=0)
730 plt.plot(freqs1,meanculture4MIC)
731
732 #Culture 5 ACC Across Days
733
734 meanculture5ACC=np.mean(np.array([s1cultivo51,s1cultivo52,s1cultivo53,
    s1cultivo54]),axis=0)
735 plt.plot(freqs1,meanculture5ACC)
736
```

```
737 #Culture 5 MIC Across Days
738
739 meanculture5MIC=np.mean(np.array([s2cultivo51,s2cultivo52,s2cultivo53,
      s2cultivo53]),axis=0)
740 plt.plot(freqs1,meanculture5MIC)
741
742 #Culture 6 ACC Across Days
743
744 meanculture6ACC=np.mean(np.array([s1cultivo61,s1cultivo62,s1cultivo63]),
      axis=0)
745 plt.plot(freqs1,meanculture6ACC)
746
747 #Culture 6 MIC Across Days
748
749 meanculture6MIC=np.mean(np.array([s2cultivo61,s2cultivo62,s2cultivo63,
      s2cultivo63]),axis=0)
750 plt.plot(freqs1,meanculture6MIC)
751
752 #Culture 7 ACC Across Days
753
754 meanculture7ACC=np.mean(np.array([s1cultivo71,s1cultivo72,s1cultivo73,
      s1cultivo74]),axis=0)
755 plt.plot(freqs1,meanculture7ACC)
756
757 #Culture 7 MIC Across Days (falta cultivo 7 dia 4 mic!!!)
758
759 meanculture7MIC=np.mean(np.array([s2cultivo71,s2cultivo72,s2cultivo73]),
      axis=0)
760 plt.plot(freqs1,meanculture7MIC)
761
762
763
764
```

```
765
766 ##### MEAN entre cultivos
767
768
769 meanculturesACC = np.mean(np.array([meanculture1ACC ,
770                                     meanculture2ACC ,
771                                     meanculture3ACC ,
772                                     meanculture4ACC ,
773                                     meanculture5ACC ,
774                                     meanculture6ACC ,
775                                     meanculture7ACC
776                                     ]),axis=0)
777 meanculturesMIC = np.mean(np.array([meanculture1MIC ,
778                                     meanculture2MIC ,
779                                     meanculture3MIC ,
780                                     meanculture4MIC ,
781                                     meanculture5MIC ,
782                                     meanculture6MIC ,
783                                     meanculture7MIC
784                                     ]),axis=0)
785
786 plt.xscale('linear')
787 plt.plot(freqs1,meanculturesMIC,'c')
788 plt.plot(freqs1,meanculturesACC,'pink')
789 plt.show()
790
791
792 ##### Diferencias                !!!!!!! Aqu  ahora si hay algo
793                                     !!!!!!!! (peque o eso si...)
794 difACC=meanculturesACC-meancaliACC
795 difMIC=meanculturesMIC-meancaliMIC
796
```

```
797 plt.xscale('linear')
798 plt.plot(freqs1,difACC,'k')
799 plt.plot(freqs1,difMIC,'r')
800
801
802 mdifACC = pd.Series(difACC).rolling(50,win_type='hamming').mean()
803 mdifMIC = pd.Series(difMIC).rolling(50,win_type='hamming').mean()
804
805
806 AmdifMIC=np.array(mdifMIC)
807 AmdifMICdelete=np.delete(AmdifMIC,np.s_[:100])
808 freqs1delete=np.delete(freqs1,np.s_[:100])
809 print(len(freqs1delete))
810 #
811 #plt.plot(freqs1,mdifMIC)
812 #plt.plot(freqs1delete,AmdifMICdelete)
813
814 MAX1=np.max(mdifMIC)
815 MAX2=np.max(AmdifMICdelete)
816 print(MAX1,MAX2)
817
818 ARGMAX1=np.argmax(mdifMIC)
819 ARGMAX2=np.argmax(AmdifMICdelete)
820 print(ARGMAX1,ARGMAX2+100)
821
822 difACCaverage=np.average(difACC,axis=None,weights=None,returned=False
    )
823 difMICaverage=np.average(difMIC,axis=None,weights=None,returned=False
    )
824
825 print(difACCaverage)
826 print(difMICaverage)
827
```

```
828 sdifACC = pd.Series(difACC).rolling(50).std()
829 sdifMIC = pd.Series(difMIC).rolling(50).std()
830
831
832
833
834 plt.plot(freqs1,mdifACC,'k--',label='ACC mean (av=0.035,p-value=0.7958)'
835         )
836
837
838 plt.plot(freqs1,mdifMIC,'r--',label='MIC mean (av=0.373,p-value=0.0054)'
839         )
840
841 plt.fill_between(freqs1, mdifACC-2*sdifACC, mdifACC+2*sdifACC,color='
842         grey',alpha=0.2,label='ACC Standard Deviation')
843
844
845 plt.fill_between(freqs1, mdifMIC-2*sdifMIC, mdifMIC+2*sdifMIC,color='red
846         ',alpha=0.2,label='MIC Standard Deviation')
847
848
849 xy = (3834, 0.52)
850
851 plt.plot(xy[0], xy[1], '+b', mew=3, ms=8)
852
853
854
855
856 xy1 = (888, 0.58)
857
858 plt.plot(xy1[0], xy1[1], '+b', mew=3, ms=8)
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
```

```
,
857         arrowprops=dict(arrowstyle='->'),
858     )
859 plt.annotate('(888 Hz, 0.58 dBVrms)', xy=(880, .55), xytext=(1000, .2),
860         arrowprops=dict(arrowstyle='->'),
861     )
862
863 plt.xlabel('Frequency [Hz]')
864 plt.ylabel('Spectral Power [dBVrms]')
865 plt.title('Acoustic Emission Difference (Across Cultures & Days)')
866 plt.xscale('linear')
867 plt.xlim((600,6400))
868 plt.ylim((-0.5,.7))
869 plt.legend()
870 plt.show()
871
872
873
874 ## Cross Checking with the internal scipy function
875 t1, p1 = stats.ttest_ind(meanculturesACC,meancaliACC)
876 print("t = " + str(t1))
877 print("p = " + str(p1))
878
879 t2, p2 = stats.ttest_ind(meanculturesMIC,meancaliMIC)
880 print("t = " + str(t2))
881 print("p = " + str(p2))
882
883 ## Cross Checking with the internal scipy function ---- REMOVE!!!!!!!
884
885 meanculturesACC2=np.delete(meanculturesACC,np.s_[:100])
886 meanculturesMIC2=np.delete(meanculturesMIC,np.s_[:100])
887
888 meancaliACC2=np.delete(meancaliACC,np.s_[:100])
```

```
889 meancaliMIC2=np.delete(meancaliMIC,np.s_[:100])
890
891 t3, p3 = stats.ttest_ind(meanculturesACC2,meancaliACC2)
892 print("t = " + str(t3))
893 print("p = " + str(p3))
894
895 t4, p4 = stats.ttest_ind(meanculturesMIC2,meancaliMIC2)
896 print("t = " + str(t4))
897 print("p = " + str(p4))
898
899 print(len(meanculturesMIC2),len(meanculturesMIC))
900
901
902 ##### Across Cultures Day 1
903
904 meanculturesMIC1 = np.mean(np.array([a,
905                                     c,
906                                     e,
907                                     g,
908                                     i,
909                                     k,
910                                     n
911                                     ]),axis=0)
912
913 meanculturesACC1 = np.mean(np.array([b,
914                                     d,
915                                     f,
916                                     h,
917                                     j,
918                                     l,
919                                     m
920                                     ]),axis=0)
921 #plt.plot(meanculturesMIC1,color='r',alpha=0.4,label='Day 1')
```

```
922 plt.plot(meanculturesACC1 , color='blue' , alpha=0.1 , label='Day 1')
923
924 ##### Across Cultures Day 2
925
926 meanculturesMIC2 = np.mean(np.array([a2,
927                                     c2,
928                                     e2,
929                                     g2,
930                                     i2,
931                                     k2,
932                                     n2
933                                     ]), axis=0)
934
935 meanculturesACC2 = np.mean(np.array([b2,
936                                     d2,
937                                     f2,
938                                     h2,
939                                     j2,
940                                     l2,
941                                     m2
942                                     ]), axis=0)
943
944 #plt.plot(meanculturesMIC2 , color='b' , alpha=0.4 , label='Day 2')
945 plt.plot(meanculturesACC2 , color='blue' , alpha=0.2 , label='Day 2')
946
947 ##### Across Cultures Day 3
948
949 meanculturesMIC3 = np.mean(np.array([a3,
950                                     c3,
951                                     e3,
952                                     g3,
953                                     i3,
954                                     k3,
```

```
955         n3
956     ]),axis=0)
957
958 meanculturesACC3 = np.mean(np.array([b3,
959         d3,
960         f3,
961         h3,
962         j3,
963         l3,
964         m3
965     ]),axis=0)
966
967 #plt.plot(meanculturesMIC3,color='g',alpha=0.4,label='Day 3')
968 plt.plot(meanculturesACC3,color='blue',alpha=0.4,label='Day 3')
969
970 ##### Across Cultures Day 4
971
972 meanculturesMIC4 = np.mean(np.array([a4,
973         c4,
974         e4,
975         g4,
976         i4,
977         #k4,
978         #n4
979     ]),axis=0)
980
981 meanculturesACC4 = np.mean(np.array([b4,
982         d4,
983         #f4,
984         h4,
985         j4,
986         #l4,
987         m4
```

```
988         ]),axis=0)
989
990 meantotMIC=np.mean(np.array([meanculturesMIC1,meanculturesMIC2,
991     meanculturesMIC3,meanculturesMIC4]),axis=0)
992
993 meantotACC=np.mean(np.array([meanculturesACC1,meanculturesACC2,
994     meanculturesACC3,meanculturesACC4]),axis=0)
995
996 #plt.plot(meanculturesMIC4,color='c',alpha=0.4,label='Day 4')
997 plt.plot(meanculturesACC4,color='blue',alpha=0.8,label='Day 4')
998
999 #####slope ACC
1000
1001 #slope, intercept = np.polyfit(np.log(meanculturesMIC2),np.log(
1002     freqs1delete),1)
1003 #print('slope',slope)
1004
1005 plt.plot(meantotACC,'r',label='Mean')
1006 plt.ylim((-15,0))
1007 plt.xlim((100,800))
1008 plt.xscale('log')
1009 plt.xlabel('Frequency [Hz] (log scale)')
1010 plt.ylabel('Spectral Power [dBVrms]')
1011 plt.title('Mean Acoustic Emission Difference (Acc. Data, In Between Days
1012     )')
1013 plt.legend()
1014 plt.show()
1015
1016 plt.plot(meanculturesMIC1,color='r',alpha=0.4,label='Day 1')
1017 plt.plot(meanculturesMIC2,color='b',alpha=0.4,label='Day 2')
1018 plt.plot(meanculturesMIC3,color='g',alpha=0.4,label='Day 3')
1019 plt.plot(meanculturesMIC4,color='c',alpha=0.4,label='Day 4')
```

```
1017
1018 plt.plot(meantotMIC, 'k', label='Mean')
1019 plt.ylim((0,22))
1020 plt.xlim((100,800))
1021 plt.xscale('log')
1022 plt.xlabel('Frequency [Hz] (log scale)')
1023 plt.ylabel('Spectral Power [dBVrms]')
1024 plt.title('Mean Acoustic Emission Difference (Mic. Data, In Between Days
           )')
1025 plt.legend()
1026 plt.show()
1027
1028
1029 #plt.plot(meanculturesMIC1, color='r', alpha=0.4, label='Day 1')
1030
1031 ## Cross Checking with the internal scipy function DIA 1-4 contra CALI
      MIC
1032
1033 t5, p5 = stats.ttest_ind(calimic1, meanculturesMIC1)
1034 print("t = " + str(t5))
1035 print("p = " + str(p5))
1036
1037 t6, p6 = stats.ttest_ind(calimic2, meanculturesMIC2)
1038 print("t = " + str(t6))
1039 print("p = " + str(p6))
1040
1041 t7, p7 = stats.ttest_ind(calimic3, meanculturesMIC3)
1042 print("t = " + str(t7))
1043 print("p = " + str(p7))
1044
1045 t8, p8 = stats.ttest_ind(calimic4, meanculturesMIC4)
1046 print("t = " + str(t8))
1047 print("p = " + str(p8))
```

## C.2. “A 3D printable device for spatio-temporal quantification of fluorescently-tagged bacteria in spatially-explicit environments”

### Abstract

In natural environments, microbes live in multi-species communities exposed to a range of environmental conditions that change in time and space. Despite its relevance in the health of humans, animals and ecosystems, studying in the lab the population dynamics of mixed cultures in structured environments remains a challenging problem. Here we describe an opto-mechanical device designed with the aim of acquiring multi-channel time-lapse images of bacterial colonies growing in agar plates. This device uses a system of adressable LEDs and fluorescence filters to estimate the spatio-temporal distribution of different fluorescently-tagged sub-populations from time-lapse images obtained using a standard DSLR camera with a macro lens. (...)

Falta acabar el METAPAPER YA YA YA!!!

## C.3. Estímulos Sonoros con Ruido Blanco

```
1 #!/usr/bin/env python2
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3 """
4 Created on Thu Apr 18 13:17:38 2019
5
6 @author: carlestapi
7
8 """
9
10 ##### Noise Stimulation - Experiment Day 5
11
```

```
12 #####
13
14 from scipy import signal
15 from scipy import stats
16
17 import matplotlib.pyplot as plt
18 import numpy as np
19 import pandas as pd
20
21 ##### CALIBRACIONES #####
22 #####
23
24 ##### Calibraci n 1 NO RUIDO MIC
25 names = ['frequency1', 'cali1noruidoMIC']
26 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
    espectroESTIMULO/caliNoRuido1SCRN0049.TXT', header=2, names=names)
27 freqs1 = df.frequency1.values
28 cali1noruidoMIC = df.cali1noruidoMIC.values
29 ##### Calibraci n 1 NO RUIDO ACC
30 names = ['frequency1', 'cali1noruidoACC']
31 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
    espectroESTIMULO/caliNoRuido1SCRN0050.TXT', header=2, names=names)
32 freqs1 = df.frequency1.values
33 cali1noruidoACC = df.cali1noruidoACC.values
34 ##### Calibraci n 2 NO RUIDO MIC
35 names = ['frequency1', 'cali2noruidoMIC']
36 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
    espectroESTIMULO/caliNoRuido2SCRN0055.TXT', header=2, names=names)
37 freqs1 = df.frequency1.values
38 cali2noruidoMIC = df.cali2noruidoMIC.values
39 ##### Calibraci n 2 NO RUIDO ACC
40 names = ['frequency1', 'cali2noruidoACC']
41 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
```

```
    espectroESTIMULO/caliNoRuido2SCRN0057.TXT', header=2, names=names)
42 freqs1 = df.frequency1.values
43 cali2noruidoACC = df.cali2noruidoACC.values
44
45 #plt.plot(freqs1, cali1noruidoMIC)
46 #plt.plot(freqs1, cali1noruidoACC)
47 #plt.plot(freqs1, cali2noruidoMIC)
48 #plt.plot(freqs1, cali2noruidoACC)
49 #plt.xscale('log')
50
51 ##### MEDIDAS PRE RUIDO ##### en cultivo 8
52 #####
53
54 #### Medida 4 Vpp MIC
55 names = ['frequency1', 'pre4vppMIC']
56 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
    espectroESTIMULO/4VPPcultivo8preSCRN0059.TXT', header=2, names=names)
57 freqs1 = df.frequency1.values
58 pre4vppMIC = df.pre4vppMIC.values
59
60 #### Medida 4 Vpp ACC
61 names = ['frequency1', 'pre4vppACC']
62 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
    espectroESTIMULO/4VPPcultivo8preSCRN0060.TXT', header=2, names=names)
63 freqs1 = df.frequency1.values
64 pre4vppACC = df.pre4vppACC.values
65
66
67 #### Medida 8 Vpp MIC
68 names = ['frequency1', 'pre8vppMIC']
69 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
    espectroESTIMULO/8VPPcultivo8preSCRN0068.TXT', header=2, names=names)
70 freqs1 = df.frequency1.values
```

```
71 pre8vppMIC = df.pre8vppMIC.values
72
73 ##### Medida 8 Vpp ACC
74 names = ['frequency1', 'pre8vppACC']
75 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
       espectroESTIMULO/8VPPcultivo8preSCRN0069.TXT', header=2, names=names)
76 freqs1 = df.frequency1.values
77 pre8vppACC = df.pre8vppACC.values
78
79
80 #plt.plot(freqs1,pre4vppMIC)
81 #plt.plot(freqs1,pre4vppACC)
82 #plt.plot(freqs1,pre8vppMIC)
83 #plt.plot(freqs1,pre8vppACC)
84 #plt.xscale('log')
85
86
87
88 ##### MEDIDAS POST RUIDO ##### en cultivo 8
89 #####
90
91 ##### Medida 4 Vpp MIC
92 names = ['frequency1', 'post4vppMIC']
93 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
       espectroESTIMULO/4VPPcultivo8postSCRN0065.TXT', header=2, names=names
       )
94 freqs1 = df.frequency1.values
95 post4vppMIC = df.post4vppMIC.values
96
97 ##### Medida 4 Vpp ACC
98 names = ['frequency1', 'post4vppACC']
99 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:
       espectroESTIMULO/4VPPcultivo8postSCRN0066.TXT', header=2, names=names
```

```
)  
100 freqs1 = df.frequency1.values  
101 post4vppACC = df.post4vppACC.values  
102  
103  
104 ##### Medida 8 Vpp MIC  
105 names = ['frequency1', 'post8vppMIC']  
106 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:  
    espectroESTIMULO/8VPPcultivo8PostSCRN0074.TXT', header=2, names=names  
    )  
107 freqs1 = df.frequency1.values  
108 post8vppMIC = df.post8vppMIC.values  
109  
110 ##### Medida 8 Vpp ACC  
111 names = ['frequency1', 'post8vppACC']  
112 df = pd.read_table('/Users/carlestapi/Desktop/ANECOICA/12abril:  
    espectroESTIMULO/8VPPcultivo8PostSCRN0075.TXT', header=2, names=names  
    )  
113 freqs1 = df.frequency1.values  
114 post8vppACC = df.post8vppACC.values  
115  
116  
117 #plt.plot(freqs1, post4vppMIC)  
118 #plt.plot(freqs1, post4vppMIC)  
119 #plt.plot(freqs1, post8vppMIC)  
120 #plt.plot(freqs1, post8vppACC)  
121 #plt.xscale('log')  
122  
123  
124  
125 ##### DIFERENCIAS  
126  
127
```

```
128 a= post4vppMIC -pre4vppMIC
129 b= post8vppMIC -pre8vppMIC
130
131 c= post4vppACC -pre4vppACC
132 d= post8vppACC -pre8vppACC
133
134 #plt.plot(freqs1,a)
135 #plt.plot(freqs1,b)
136 #
137 #plt.xscale('linear')
138 #plt.show()
139 #
140 #plt.plot(freqs1,c)
141 #plt.plot(freqs1,d)
142 #
143 #plt.xscale('linear')
144 #plt.show()
145
146
147 #####
148
149 ma = pd.Series(a).rolling(50).mean()
150 mb = pd.Series(b).rolling(50).mean()
151 mc = pd.Series(c).rolling(50).mean()
152 md = pd.Series(d).rolling(50).mean()
153
154
155 plt.plot(8*ma.index,ma,label='4Vpp Stimulus MIC')
156 plt.plot(8*mb.index,mb,label='8Vpp Stimulus MIC')
157 plt.plot(8*mc.index,mc,label='4Vpp Stimulus ACC')
158 plt.plot(8*md.index,md,label='8Vpp Stimulus ACC')
159
160
```

```
161
162 ##### Rolling Standard Deviation
163
164 sa = pd.Series(a).rolling(50).std()
165 sb = pd.Series(b).rolling(50).std()
166 sc = pd.Series(c).rolling(50).std()
167 sd = pd.Series(d).rolling(50).std()
168
169
170 plt.fill_between(8*ma.index, ma-2*sa, ma+2*sa,color='grey',alpha=0.1,
171                 label='Standard Deviation')
172 plt.fill_between(8*mb.index, mb-2*sb, mb+2*sb,color='grey',alpha=0.1)
173 plt.fill_between(8*mc.index, mc-2*sc, mc+2*sc,color='grey',alpha=0.1)
174 plt.fill_between(8*md.index, md-2*sd, md+2*sd,color='grey',alpha=0.1)
175 plt.legend()
176 plt.xlabel('Frequency Samples [Hz]')
177 plt.ylabel('Spectral Power [dBVrms]')
178 plt.title('Mean Acoustic Emission Difference (Before & After Noise
179           Stimulus)')
```

# Apéndice D

## Anexo Capítulo 4

### D.1. Código de Simulación Numérica de Péndulos (Processing) y Sonificación Metrónomos (PD)

```
1 import oscP5.*;
2 import netP5.*;
3
4 OscP5 oscP5;
5 NetAddress myRemoteLocation;
6
7 float[] frequencies;      // Mantiene las freqs de los pendulos
8 PVector[] positions;     // Mantiene la pos de las bolas
9 float[] positionsx;
10
11 float amplitude;         // Rango bolas
12 float freqMult = 0.001; // Shift entre freqs
13 int totalPen;           // Numero de pendulos
14
15
16 boolean total20 = true;  // 20 o 40 pendulos
17 boolean prevTotal20 = true; // Es 20 o 40?
```

```
18 float xPos, yPos;           // Posiciones pendulos
19
20 float xCenter;             // Alineamiento x
21 float boxHeight;          // Altura
22
23 float two_pi = 6.283185307;
24
25 // Drawing options
26 boolean draw1 = true;
27 boolean draw2 = true;
28 boolean draw3 = true;
29 boolean drawBalls = true;
30 boolean alignSin = true;
31
32 // TIME
33 float timeValue=0;
34 float timeSpeed=1;
35
36 boolean debugOn = false;
37
38 // BUTTONS
39 int clickCount = 0; // so a button is activated only once per click
40 Button ballButton, numBallsButton, line1Button, line2Button, line3Button
    , labelButton;
41 Button pauseButton, speedButton;
42
43 void setup(){
44     size(720, 720);
45     frameRate(30);
46     amplitude = width/8;
47     setupPendulum();
48     setupButtons();
49
```

```
50  /* start oscP5, listening for incoming messages at port 12000 */
51  oscP5 = new OscP5(this,57120);
52
53  /* myRemoteLocation is a NetAddress. a NetAddress takes 2 parameters,
54  * an ip address and a port number. myRemoteLocation is used as
55  * parameter in
56  * oscP5.send() when sending osc packets to another computer, device,
57  * application. usage see below. for testing purposes the listening
58  * port
59  * and the port of the remote location address are the same, hence you
60  * will
61  * send messages back to this sketch.
62  */
63  myRemoteLocation = new NetAddress("127.0.0.1",12000);
64 }
65
66
67 void draw(){
68     background(40,40,45);
69
70     // Buttons...
71     displayButtons();
72     displayButtonLabels();
73     displayTitle();
74     displayPhaseCircle();
75
76     if(debugOn){
77         debug();
78     }
79
80     calculatePositions();
81
82     if(labelButton.state){
```

```
80  drawGuides();
81  drawLabels();
82 }
83
84 if(line3Button.state){
85     drawLine(3, color(230, 180, 70));
86 }
87 if(line2Button.state){
88     drawLine(2, color(230, 115, 70));
89 }
90 if(line1Button.state){
91     drawLine(1, color(230, 70, 65));
92 }
93
94 setBobColor();
95
96 if(ballButton.state){
97     // This loop draws the 'bobs'.
98     for (int i = 0; i<totalPen; i++){
99         ellipse(positions[i].x, positions[i].y, 18, 18);
100    }
101 }
102
103 totalPenChange();
104
105 incrementTime();
106
107 if(frameCount % 2 == 0){
108     saveFrame("save2color/####.png");
109 }
110
111 }// end draw
112
```

```
113 class Button {
114     int x, y, w, h;
115     String label, shortcut;
116     String onText, offText;
117     color onColorFore, offColorFore;
118     color onColorBack, offColorBack;
119     boolean state;
120     float labelWidth;
121
122     Button(int x_, int y_, int w_, int h_, String label_, String shortcut_
123         ){
124         x = x_;
125         y = y_;
126         w = w_;
127         h = h_;
128         label = label_;
129         shortcut = shortcut_;
130         state = true;
131         textSize(16);
132         labelWidth = textWidth(label);
133
134         onColorFore = color(255, 200);
135         onColorBack = color(255, 100);
136
137         offColorFore = color(0, 230);
138         offColorBack = color(100, 180);
139
140         onText = "on";
141         offText = "off";
142     }
143
144 }
```

```
145 void update(){
146     if(clickCount == 0){
147         if(over()){
148             if(mousePressed==true){
149                 state =! state;
150                 clickCount++;
151             }
152         }
153     }
154     display();
155
156 }
157
158 void display(){
159
160     textAlign(CENTER, CENTER);
161     textSize(16);
162
163     if(state==true){
164         noStroke();
165         fill(onColorBack);
166         rect(x,y,w,h);
167         fill(onColorFore);
168         text(onText, x+w/2, y+h/2);
169     } else {
170         noStroke();
171         fill(offColorBack);
172         rect(x,y,w,h);
173         fill(offColorFore);
174         text(offText, x+w/2, y+h/2);
175     }
176
177     textAlign(LEFT, CENTER);
```

```
178
179     if(state){
180         fill(255, 160);
181     } else {
182         fill(255, 80);
183     }
184     text(label, x+w+6, y + h/2);
185
186
187     textAlign(CENTER, CENTER);
188     text(shortcut, x-28, y + h/2);
189
190 }
191
192 boolean over() {
193     if (mouseX >= x -33 && mouseX <= x + w + 6 + labelWidth && mouseY
194     >= y && mouseY <= y + h)
195     {
196         return true;
197     } else {
198         return false;
199     }
200 }
201 void setBobColor(){
202     // stroke(10);
203     noStroke();
204     fill(255, 255);
205     strokeWeight(1);
206 }
207
208 // This function draws lines that connect the pendulums
209 void drawLine(int n, color c){
```

```
210     strokeWeight(4);
211     stroke(c);
212     for(int i=0; i<totalPen-n; i++){
213         line(positions[i].x, positions[i].y, positions[i+n].x, positions[i+n]
214             ].y);
215     }
216 }
217
218 // This function allows time to progress at a slow or fast rate, or
219 // pause
220 void incrementTime(){
221     if(pauseButton.state==false){
222         if(speedButton.state==false){
223             timeValue += timeSpeed;
224         } else{
225             timeValue += timeSpeed*2;
226         }
227     }
228 }
229 // This function sets up the frequency and position arrays for the
230 // pendulums
231 void setupPendulum(){
232     xCenter = 6*width/10 + 85;
233     boxHeight = height-25;
234
235     if(total20){
236         totalPen = 20;
237         freqMult = 0.001;
238     } else {
239         totalPen = 40;
```

```
240     freqMult = 0.0005;
241 }
242
243 frequencies = new float[totalPen];
244 positions = new PVector[totalPen];
245 //positionsx = new float[totalPen];
246
247 for (int i = 0; i < totalPen; i++){
248
249     frequencies[i] = (i+1) * freqMult;
250
251 }
252 }
253
254 // Has the state of the "Number of pendulums" button changed? If so, run
    the setupPendulum() function
255 void totalPenChange(){
256     total20 = numBallsButton.state;
257     if(total20 == prevTotal20){
258         setupPendulum();
259     }
260     prevTotal20 = total20;
261 }
262
263 // Draw the horizontal lines underneath each of the pendulums
264 void drawGuides(){
265     strokeWeight(1);
266     stroke(255, 30);
267     for(int i = 0; i < totalPen; i++){
268         line(xCenter-amplitude, positions[i].y, xCenter+amplitude, positions
            [i].y);
269     }
270 }
```

```
271
272 // Draw the text labels above and two the right of the pendulums
273 void drawLabels(){
274     textSize(12);
275     fill(255, 70);
276     for(int i = 0; i<totalPen; i++){
277         textAlign(CENTER, CENTER);
278         text(i+1, xCenter+amplitude + 27, positions[i].y);
279     }
280
281     int yOffset;
282
283     if(total20){
284         yOffset = 20;
285     } else{
286         yOffset = 15;
287     }
288     text("freq.", xCenter+amplitude + 27, yOffset);
289     text("p ndulos", xCenter, yOffset);
290 }
291
292 // Draw the title information in the upper-righthand corner
293 void displayTitle(){
294     int x = 110;
295     int y = 40;
296
297     textSize(30);
298     textAlign(LEFT, TOP);
299     fill(255, 255);
300     textLeading(32);
301     text("P ndulos\nSincron a", x, y);
302     fill(255, 0);
303     text("P ndulos\nSincron a", x+1, y);
```

```
304
305 fill(255, 127);
306 textSize(14);
307 text("", x, y+67);
308 textSize(12);
309 text("",x, y+83 );
310 }
311
312 // setup the buttons used to control the simulation.
313 void setupButtons(){
314     int x = 110;
315     int y = 210;
316     int w = 40;
317     int h = 30;
318     int yGap = 32;
319     int drawGap = 0;
320
321     ballButton = new Button(x,y+yGap*0+drawGap, w, h, "p ndulos", "0");
322     numBallsButton = new Button(x, y+yGap*4+8, w, h, "n mero de p ndulos", "N");
323     numBallsButton.onText = "20";
324     numBallsButton.offText = "40";
325     line1Button = new Button(x, y+yGap*1+drawGap, w, h, "l nea 1", "1");
326     line2Button = new Button(x, y+yGap*2+drawGap, w, h, "l nea 2", "2");
327     line3Button = new Button(x, y+yGap*3+drawGap, w, h, "l nea 3", "3");
328     labelButton = new Button(x, y+yGap*5+drawGap + 8, w, h, "etiquetas", "E");
329     // labelButton.state = false;
330     pauseButton = new Button(x, y+yGap*6 + 70, w, h, "pausar", "P");
331     pauseButton.state = false;
332     speedButton = new Button(x, y+yGap*7 + 70, w, h, "velocidad", "V");
333     speedButton.onText = "rap";
334     speedButton.offText = "lent";
```

```
335     speedButton.state = false;
336
337 }
338
339 // Draw the labels that annotate the buttons
340 void displayButtonLabels(){
341     // x and y should match x and y in setupButtons();
342     int x = 110;
343     int y = 210;
344
345     textSize(16);
346     fill(255, 255);
347     textAlign(LEFT, TOP);
348     text("Opciones Dibujo", x, y-30);
349
350     text("Opciones Tiempo", x, y+232);
351
352     textAlign(CENTER, TOP);
353     textSize(12);
354     textLeading(11);
355     fill(255, 100);
356     text("", x-30, y-32);
357
358     stroke(255, 70);
359     strokeWeight(1);
360     line(x, y-9, x+220, y-9 );
361     line(x, y+253, x+130, y+253);
362 }
363
364
365
366 void displayButtons(){
367     ballButton.update();
```

```
368 numBallsButton.update();
369 line1Button.update();
370 line2Button.update();
371 line3Button.update();
372 labelButton.update();
373 pauseButton.update();
374 speedButton.update();
375
376 }
377
378 // This circle simply displays the phase of the system. When the
    // indictor line makes a complete revolution, the pendulum-system
    // repeats itself.
379 void displayPhaseCircle(){
380     float x = 163;
381     float y = 640;
382     float d = 60;
383     float angle = timeValue*freqMult*two_pi - two_pi/4;
384
385     textSize(16);
386     textAlign(LEFT, CENTER);
387     fill(255,255);
388     text("Fase", 110, y - d/2 -35);
389     // text("phase", x, y-12);
390
391     stroke(255, 70);
392     strokeWeight(1);
393     line(110, y - d/2 - 24, 110+105, y - d/2 - 24);
394
395     strokeWeight(1);
396     stroke(255, 100);
397     fill(255, 30);
398     ellipseMode(CENTER);
```

```
399 ellipse(x, y, d, d);
400
401 // Tick marks
402 strokeWidth(1);
403 stroke(255, 100);
404 float tick = 0.8;
405 line(x, y-tick*d/2, x, y-d/2); // zero or two-pi (top of circle);
406 line(x + tick*d/2, y, x+d/2, y); // pi/2
407 line(x, y+tick*d/2, x, y+d/2); // pi
408 line(x- tick*d/2, y, x-d/2, y); // 3pi/2
409
410 textSize(12);
411 fill(255, 150);
412 textAlign(CENTER, CENTER);
413 text("0", x+1, y -d/2 -10);
414 // text(" /2", x+d/2 + 15, y-2);
415 text(" ", x, y + d/2 + 8);
416 //text("3 /2", x-d/2-17, y-2);
417
418
419 // 3pi/2 on two lines so it looks nicer
420 text("3 ", x-d/2-14, y-8);
421 text("2", x-d/2-14, y+6);
422 stroke(255, 100);
423 strokeWidth(1);
424 line(x-d/2-22, y, x-d/2-6, y);
425
426 // pi/2 on two lines so it looks nicer
427 text(" ", x+d/2+12, y-8);
428 text("2", x+d/2+12, y+6);
429 stroke(255, 100);
430 strokeWidth(1);
431 line(x+d/2+18, y, x+d/2+6, y);
```

```
432
433 // Indicating line...the vertical spacing will depend on how the font
434 // is rendered...can be iffy.
434 strokeWidth(2);
435 stroke(255, 200);
436 line(x, y, x+(d/2)*cos(angle), y+(d/2)*sin(angle));
437 }
438
439 void debug(){
440     fill(255);
441     textSize(12);
442     textAlign(LEFT);
443     text("FPS: "+nf(frameRate, 2, 1), 12, 15);
444     text("frame number: "+frameCount, 12, 27);
445     text("time value: "+nfc(timeValue,1), 12, 39);
446     text("Hit 'D' to hide.", 12, 51);
447 }
448
449 void calculatePositions(){
450     positionsx = new float[totalPen];
451     // This loop calculates the position of all the 'bobs' (or "balls"
452     // or "pendulums") for this current frame
453     for (int i = 0; i < totalPen; i++){
454         yPos = (i+1) * ((float)boxHeight/(totalPen+1)) + 25;
455         if(alignSin==true){
456             xPos = xCenter + amplitude * sin(frequencies[i]*timeValue*two_pi)
457             ;
458         } else {
459             xPos = xCenter + amplitude * cos(frequencies[i]*timeValue*two_pi);
460         }
461         positionsx[i] = xPos;
462         positions[i] = new PVector(xPos, yPos);
463     }
464 }
```

```
462
463     /* in the following different ways of creating osc messages are
464     shown by example */
465
466     OscMessage myMessage = new OscMessage("/pos");
467
468     myMessage.add(positionsx); /* add an int to the osc message */
469
470     /* send the message */
471     oscP5.send(myMessage, myRemoteLocation);
472
473 }
474
475 void keyPressed(){
476     if (key=='1'){
477         line1Button.state =! line1Button.state;
478     }
479
480     if (key == '2'){
481         line2Button.state =! line2Button.state;
482     }
483     if (key == '3'){
484         line3Button.state =! line3Button.state;
485     }
486     if (key == ',' || key=='0'){
487         ballButton.state =! ballButton.state;
488     }
489     if (key == ' ' || key == 'p' || key == 'P'){
490         //paused =! paused;
491         pauseButton.state =! pauseButton.state;
492     }
493 }
```

```
494     if (key == 's' || key=='S'){
495         //timeSlow != timeSlow;
496         speedButton.state != speedButton.state;
497
498     }
499
500     if (key == 'n' || key == 'N'){
501         numBallsButton.state != numBallsButton.state;
502     }
503
504     if (key == 'l' || key == 'L'){
505         labelButton.state != labelButton.state;
506     }
507
508         if(key == 'd' || key == 'D'){
509             debugOn != debugOn;
510         }
511         if(key == 'r' || key == 'R'){
512             saveFrame();
513         }
514         if(key == 'q' || key == 'Q'){
515             alignSin != alignSin;
516         }
517     }
518
519 void mouseReleased(){
520     clickCount = 0;
521 }
```

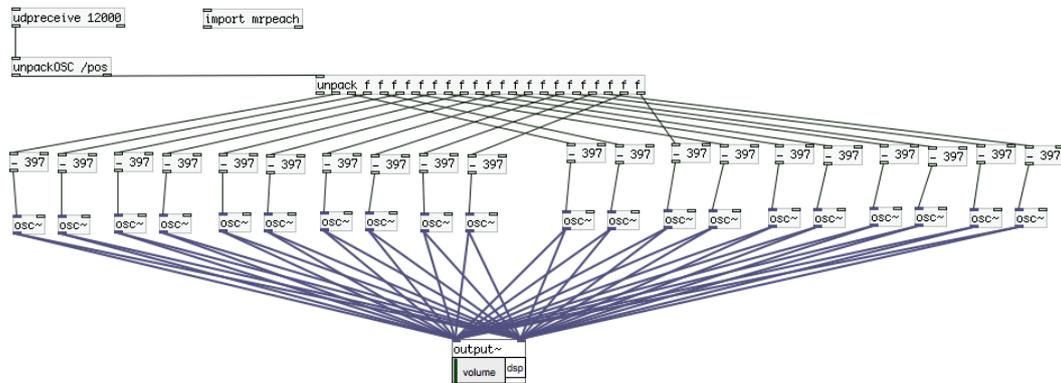


Figura D.1: Patch del sistema de sonificación de osciladores sinusoidales.

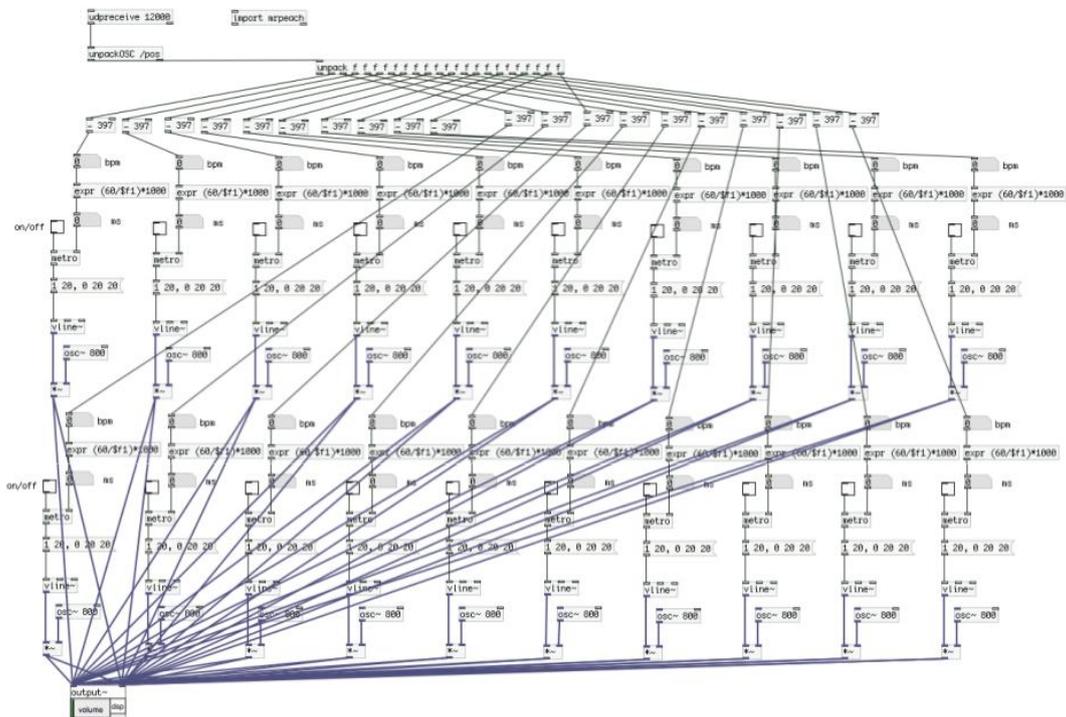


Figura D.2: Patch del sistema de sonificación de metrónomos.

## D.2. Estado Fundamental Oscilador Harmónico Cuántico Acoplado $N = 2$

Para obtener la expresión para el estado fundamental en términos de los operadores de escalera en notación de Dirac (correspondientes a un espacio de Fock), empezamos introduciendo los operadores de creación y aniquilación para los vectores propios  $x_{\pm}$  y  $p_{\pm}$ ,

$$a_{\pm} = \sqrt{\frac{\omega_{\pm}}{2}}(x_{\pm} + \frac{i}{\omega_{\pm}}p_{\pm}), \quad a_{\pm}^{\dagger} = \sqrt{\frac{\omega_{\pm}}{2}}(x_{\pm} - \frac{i}{\omega_{\pm}}p_{\pm}), \quad (\text{D.1})$$

las cuales satisfacen las relaciones de conmutación bosónicas estándar

$$[a_{-}, a_{-}^{\dagger}] = [a_{+}, a_{+}^{\dagger}] = 1. \quad (\text{D.2})$$

Debido a que el hamiltoniano está desacoplado en esta base, lo podemos escribir en función de los operadores tal que

$$H = \omega_{+}a_{+}^{\dagger}a_{+} + \omega_{-}a_{-}^{\dagger}a_{-} + \frac{1}{2}(\omega_{+}\omega_{-}), \quad (\text{D.3})$$

donde los primeros términos corresponden a los operadores de número del nuevo oscilador desacoplado, y el tercer término representa la energía del estado fundamental. Debido a la forma desacoplada de los estados propios en la ecuación anterior,  $H$  se puede escribir como un producto de los valores propios del oscilador simple de los operadores  $a_{-}^{\dagger}a_{-}$  y  $a_{+}^{\dagger}a_{+}$ . Por lo tanto tenemos que el estado fundamental se escribe en la siguiente base como

$$|0\rangle = |0\rangle_{-} \otimes |0\rangle_{+}. \quad (\text{D.4})$$

Donde claramente  $|0\rangle$  se aniquila por ambos operadores de aniquilación

$$a_{\pm}|0\rangle = 0. \quad (\text{D.5})$$

Aunque ahora hemos obtenido una expresión para el estado fundamental, esta no nos permite calcular su entrelazamiento entre los osciladores originales. La razón se debe a que la base  $\pm$  corresponde a una descomposición diferente del espacio de Hilbert que la del hamiltoniano original. Por lo tanto no podemos integrar fuera de los grados de libertad en ninguna de nuestros subespacios que hemos elegido para la base  $\pm$ . Este hecho resulta evidente también porque  $a_{\pm}$  y  $a_{\pm}^{\dagger}$  dependen de la posición y del momento originales.

Por lo tanto necesitamos expresar  $|0\rangle$  en función de los operadores de escalera que están confinados o bien en el subespacio de Hilbert  $\mathcal{H}_1$  o bien en  $\mathcal{H}_2$ , lo que es equivalente a buscar una expresión del tipo

$$|0\rangle = \sum_{n,m} C_{nm} |n\rangle_1 \otimes |m\rangle_2, \quad (\text{D.6})$$

donde  $|n\rangle_1$  constituye una base en  $\mathcal{H}_1$  y  $|m\rangle_2$  en  $\mathcal{H}_2$ . Para buscar la base buscamos la combinación lineal de  $a_{\pm}$  que también aniquile el estado fundamental. Así encontramos que

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}}(a_+ + a_-), \quad b = \frac{1}{\sqrt{2}}(a_+ - a_-), \quad (\text{D.7})$$

donde  $a$  y  $b$  son los nuevos operadores de aniquilación pero rotados  $\pi/4$  con respecto a los anteriores  $a_{\pm}$ . Ahora podemos escribir  $a, b$  en términos de los operadores de posición y momento originales,

$$a = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \left( \sqrt{\frac{\omega}{2}}(x_1 + \frac{i}{\omega}p_1) - \xi \sqrt{\frac{\omega}{2}}(x_2 - \frac{i}{\omega}p_2) \right), \quad (\text{D.8})$$

y para  $b$  se obtiene transformando  $b = a(x_1 \iff x_2, p_1 \iff p_2)$ . Ahora tenemos que

$$\omega = (\omega_+\omega)^{1/2} = 3k_0^2, \quad (\text{D.9})$$

y

$$\xi = \frac{\omega_-^2 - \omega_+^2}{\omega_-^2 + \omega_+^2} = \frac{\sqrt{3} - 1}{\sqrt{3} + 1}. \quad (\text{D.10})$$

Ahora podemos escribir

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2}}(x_1 + \frac{i}{\omega}p_1), \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega}{2}}(x_2 - \frac{i}{\omega}p_2), \quad (\text{D.11})$$

y en función de  $a, b$  como

$$a = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}(\alpha - \beta^\dagger), \quad b = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}}(\beta - \xi\alpha^\dagger). \quad (\text{D.12})$$

En este caso vemos que  $\alpha$  aún estando descrito por  $x_1$  y  $p_1$ , no corresponde realmente al oscilador con coordenadas  $x_1$  y  $p_1$ , ni tampoco en el caso del operador  $\beta$ . Estos últimos describen un oscilador con una frecuencia  $\omega = (\omega_-\omega_+)^{1/2}$  que resulta de rotar los valores propios del sistema.

Ya que  $a, b$  aniquilan el estado fundamental, vemos que

$$(\alpha - \xi\beta^\dagger)|0\rangle = (\beta - \xi\alpha^\dagger)|0\rangle = 0, \quad (\text{D.13})$$

y por lo tanto

$$\alpha|0\rangle = \xi\beta^\dagger|0\rangle, \quad \beta|0\rangle = \xi\alpha^\dagger|0\rangle. \quad (\text{D.14})$$

Escribiendo el estado fundamental a partir de estos operadores tenemos que

$$\alpha|0\rangle = \sum_{n,m} C_{nm}\sqrt{n}|n-1\rangle \otimes |m\rangle_2 = \sum_{n,m} C_{(n+1)m}\sqrt{n+1}|n\rangle \otimes |m\rangle_2, \quad (\text{D.15})$$

donde hemos usado que  $\alpha^\dagger$  actúa sobre  $|n\rangle_1$  como un operador estándar de escalera tal que

$$\alpha|n\rangle_1 = \sqrt{n}|n-1\rangle_1, \quad \alpha^\dagger|n\rangle_1 = \sqrt{n+1}|n+1\rangle_1. \quad (\text{D.16})$$

Por otro lado vemos que

$$\xi\beta^\dagger|0\rangle = \sum_{n,m} \xi C_{nm} \sqrt{m+1}|n\rangle_1 \otimes |m+1\rangle_2 = \sum_{n,m} \xi C_{n(m-1)} \sqrt{m}|n\rangle_1 \otimes |m\rangle_2. \quad (\text{D.17})$$

Igualando las ecuaciones obtenemos

$$C_{(n+1)m} \sqrt{n+1} = \xi C_{n(m-1)} \sqrt{m}. \quad (\text{D.18})$$

Igualmente obtenemos que

$$C_{n(m+1)} \sqrt{m+1} = \xi C_{(n-1)m} \sqrt{n}, \quad (\text{D.19})$$

y

$$C_{nm} = \xi C_{(n-m)(m-1)} \sqrt{\frac{m}{n}}, \quad C_{nm} = \xi C_{(n-1)(m-1)} \sqrt{\frac{n}{m}} \quad (\text{D.20})$$

Estas últimas ecuaciones solo se pueden cumplir en el caso específico que  $C_{n,m} \propto \xi^n \delta_{nm}$ . Para encontrar el factor de proporcionalidad justo utilizamos la normalización del estado fundamental tal que  $\sum_{nm} |C_{nm}|^2 = 1$ . A partir de aquí obtenemos

$$C_{nm} = \sqrt{1 - \xi^2} \xi^n \delta_{nm}, \quad (\text{D.21})$$

y como por definición  $0 < \xi < 1$ , tenemos finalmente que el estado fundamental se

puede escribir como

$$|0\rangle = \sqrt{1 - \xi^2} \sum_{nm} |n\rangle_1 \otimes |n\rangle_2, \quad (\text{D.22})$$

que en términos de los operadores de escalera, toma finalmente la forma

$$|0\rangle = \sqrt{1 - \xi^2} \sum_{nm} \xi^n \frac{(\alpha^\dagger)^n}{\sqrt{n!}} \frac{(\beta^\dagger)^n}{\sqrt{n!}} |0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2. \quad (\text{D.23})$$

# Bibliografía

- [1] J. G. Saxe, *The blind men and the elephant*, Enrich Spot Limited (2016).
- [2] M. J. Loux and T. M. Crisp, *Metaphysics: A contemporary introduction*, Routledge (2017).
- [3] M. G. Ash, *Gestalt psychology in German culture, 1890-1967: Holism and the quest for objectivity*, Cambridge University Press (1998).
- [4] G. H. Lewes, *Problems of life and mind, first series: The foundations of a creed, Vol 2.*, (1891).
- [5] T. De Wolf and T. Holvoet. *Emergence versus self-organisation: Different concepts but promising when combined*. In *International workshop on engineering self-organising applications*, pages 1–15. Springer, (2004).
- [6] J. H. Holland, *Emergence: From chaos to order*, OUP Oxford (2000).
- [7] D. V. Newman, *Emergence and strange attractors*, Philosophy of Science **63**, 245–261 (1996).
- [8] H. Haken. *An introduction*. In *Synergetics*, pages 1–387. Springer, (2004).
- [9] W. Weidlich, *Sociodynamics: A systematic approach to mathematical modelling in the social sciences*, Courier Corporation (2006).
- [10] G. Nicolis. *Physics of far-from-equilibrium systems and self-organization*. In *The new physics*. (1993).



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- 
- [11] I. Prigogine and G. Nicolis. *Self-organisation in nonequilibrium systems: towards a dynamics of complexity*. In *Bifurcation analysis*, pages 3–12. Springer, (1985).
- [12] D. Blitz, *Emergent evolution: qualitative novelty and the levels of reality*, Springer Science & Business Media (2013).
- [13] T. De Wolf and T. Holvoet. *Emergence and Self-Organisation: a statement of similarities and differences*. In *Proceedings of the International Workshop on Engineering Self-Organising Applications 2004*, pages 96–110, (2004).
- [14] P. A. Corning, *The re-emergence of “emergence”: A venerable concept in search of a theory*, *Complexity* **7**, 18–30 (2002).
- [15] J. Goldstein, *Emergence as a construct: History and issues*, *Emergence* **1**, 49–72 (1999).
- [16] J. Goldstein, *Emergence: A construct amid a thicket of conceptual snares*, *Emergence* **2**, 5–22 (2000).
- [17] H. B. Callen. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*, (1998).
- [18] A. Rivas and S. F. Huelga, *Open quantum systems*, Springer (2012).
- [19] R. Burton et al. *The elements of music: what are they, and who cares?* In *Music: Educating for Life. ASME XXth National Conference Proceedings*, page 22. Australian Society for Music Education, (2015).
- [20] J. W. Strutt and B. Rayleigh, *The theory of sound*, Dover (1945).
- [21] B. Gygi, G. R. Kidd, and C. S. Watson, *Similarity and categorization of environmental sounds*, *Perception & psychophysics* **69**, 839–855 (2007).
- [22] W. W. Gaver, *What in the world do we hear?: An ecological approach to auditory event perception*, *Ecological psychology* **5**, 1–29 (1993).

- [23] G. Lemaitre, O. Houix, N. Misdariis, and P. Susini, *Listener expertise and sound identification influence the categorization of environmental sounds.*, Journal of Experimental Psychology: Applied **16**, 16 (2010).
- [24] E. Rosch and B. Lloyd, *Principles of Categorization/Rosch E, E /Lloyd, B (eds )* (1978).
- [25] F. Guyot. *Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative: une approche par la catégorisation.* PhD thesis, Le Mans, (1996).
- [26] B. Gygi, G. R. Kidd, and C. S. Watson, *Spectral-temporal factors in the identification of environmental sounds*, The Journal of the Acoustical Society of America **115**, 1252–1265 (2004).
- [27] M. M. Marcell, D. Borella, M. Greene, E. Kerr, and S. Rogers, *Confrontation naming of environmental sounds*, Journal of clinical and experimental neuropsychology **22**, 830–864 (2000).
- [28] B. Gygi and V. Shafiro, *General functions and specific applications of environmental sound research.*, Frontiers in bioscience: a journal and virtual library **12**, 3152–3166 (2007).
- [29] X.-G. Wen, *Quantum field theory of many-body systems: from the origin of sound to an origin of light and electrons*, Oxford University Press on Demand (2004).
- [30] T. Kobayashi, R. Ikuta, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, *Frequency-domain hong-ou-mandel interference*, Nature Photonics **10**, 441 (2016).
- [31] A. Esposito, R. Krichevsky, and A. Nicolis, *Gravitational mass carried by sound waves*, Physical review letters **122**, 084501 (2019).

- [32] A. Mason, G. Morris, and P. Wall, *High ultrasonic hearing and tympanal slit function in rainforest katydids*, *Naturwissenschaften* **78**, 365–367 (1991).
- [33] G. Jones and E. C. Teeling, *The evolution of echolocation in bats*, *Trends in Ecology & Evolution* **21**, 149–156 (2006).
- [34] C. O’Connell-Rodwell, L. A. Hart, and B. Arnason, *Exploring the potential use of seismic waves as a communication channel by elephants and other large mammals*, *American Zoologist* **41**, 1157–1170 (2001).
- [35] E. R. Lewis and P. M. Narins, *Do frogs communicate with seismic signals?*, *Science* **227**, 187–189 (1985).
- [36] B. Mortimer, A. Soler, C. Siviour, R. Zaera, and F. Vollrath, *Tuning the instrument: sonic properties in the spider’s web*, *Journal of The Royal Society Interface* **13**, 20160341 (2016).
- [37] P. R. Ehrlich, D. S. Dobkin, and W. Darryl. *Bird Voices. and "Vocal Development" from Birds of Stanford essays*, (2008).
- [38] J. P. Hailman and M. S. Ficken, *Combinatorial animal communication with computable syntax: Chick-a-dee calling qualifies as "language" by structural linguistics.*, *Animal Behaviour* (1986).
- [39] V. Valerio. *The Sound/Music Dilemma: Why Is It That All Music Is Sound but Only Some Sounds Are Music?* In *Proceedings of the 1st Sound Ambiguity Conference*, pages 11–22, (2014).
- [40] P. Ball and N. R. Borley, *The self-made tapestry: pattern formation in nature*, Oxford University Press Oxford (1999).
- [41] B. Werner, *Eolian dunes: computer simulations and attractor interpretation*, *Geology* **23**, 1107–1110 (1995).

- [42] H. Weyl, *Symmetry*, Princeton University Press (2015).
- [43] S. Smirnov, *Critical percolation in the plane: conformal invariance, Cardy's formula, scaling limits*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series I-Mathematics **333**, 239–244 (2001).
- [44] N. Fatès. *Aesthetics and randomness in cellular automata*, (2016).
- [45] O. Bernardi, N. Curien, and G. Miermont, *A Boltzmann approach to percolation on random triangulations*, Canadian Journal of Mathematics **71**, 1–43 (2019).
- [46] P. S. Stevens, *Patterns in nature*, (1974).
- [47] I. Calvino, *El libro de la Naturaleza en Galileo*, Ciencias **95** (2009).
- [48] W. T. d'Arcy, *On growth and form*, Cambridge university press (1952).
- [49] J. Conway, *The game of life*, Scientific American **223**, 4 (1970).
- [50] P. Cariani and C. Micheyl. *Toward a theory of information processing in auditory cortex*. In *The human auditory cortex*, pages 351–390. Springer, (2012).
- [51] M. Thomson, K. Murphy, and R. Lukeman, *Groups clapping in unison undergo size-dependent error-induced frequency increase*, Scientific reports **8**, 808 (2018).
- [52] D. Lakens and M. Stel, *If they move in sync, they must feel in sync: Movement synchrony leads to attributions of rapport and entitativity*, Social Cognition **29**, 1–14 (2011).
- [53] A. R. Redcliffe-Brown. *The Andaman Islanders: A Study in Social Anthropology*, (1964).
- [54] B. Ehrenreich, *Dancing in the streets: A history of collective joy*, Macmillan (2007).
- [55] G. St John. *'Connectedness' and the rave experience: Rave as new religious movement?* In *Rave culture and religion*, pages 101–122. Routledge, (2004).

- [56] M. Hartbauer and H. Römer, *Rhythm generation and rhythm perception in insects: the evolution of synchronous choruses*, *Frontiers in neuroscience* **10**, 223 (2016).
- [57] K.-G. Heller, *Bioakustik der europäischen Laubheuschrecken*, J. Margraf (1988).
- [58] T. B. Schroeder, J. Houghtaling, B. D. Wilts, and M. Mayer, *It's not a bug, it's a feature: functional materials in insects*, *Advanced Materials* **30**, 1705322 (2018).
- [59] T. J. Walker, *Acoustic synchrony: two mechanisms in the snowy tree cricket*, *Science* **166**, 891–894 (1969).
- [60] A. K. Schmidt and R. Balakrishnan, *Ecology of acoustic signalling and the problem of masking interference in insects*, *Journal of Comparative Physiology A* **201**, 133–142 (2015).
- [61] B. Vonnegut, O. Vaughan Jr, M. Brook, and P. Krehbiel, *Mesoscale observations of lightning from space shuttle*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **66**, 20–29 (1985).
- [62] Y. Y. Yair, R. Aviv, and G. Ravid, *Clustering and synchronization of lightning flashes in adjacent thunderstorm cells from lightning location networks data*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **114** (2009).
- [63] F. Zoghogy, M. B. Cohen, R. Said, and U. Inan, *Statistical patterns in the location of natural lightning*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118**, 787–796 (2013).
- [64] E. Szathmáry and J. M. Smith, *The major evolutionary transitions*, *Nature* **374**, 227 (1995).
- [65] J. McWhorter, *The world's simplest grammars are creole grammars*, *Linguistic typology* **5**, 125–66 (2001).
- [66] R. P. Feynman, *The value of science*, *Engineering and Science* **19**, 13–15 (1955).

- [67] F. Pessoa, *Poemas de Alberto Caeiro*, Ediçoes Vercial (2017).
- [68] P. Grassberger, *Toward a quantitative theory of self-generated complexity*, International Journal of Theoretical Physics **25**, 907–938 (1986).
- [69] D. H. Zanette, *Quantifying the complexity of black-and-white images*, PloS one **13**, e0207879 (2018).
- [70] S. Dubnov, *Generalization of spectral flatness measure for non-gaussian linear processes*, IEEE Signal Processing Letters **11**, 698–701 (2004).
- [71] B. B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*, WH freeman New York (1983).
- [72] A. L. Goldberger, L. A. Amaral, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, C.-K. Peng, and H. E. Stanley, *Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging*, Proceedings of the national academy of sciences **99**, 2466–2472 (2002).
- [73] R. Fossion, E. Landa, P. Stránský, V. Velazquez, J. L. Vieyra, I. Garduno, D. Garcia, and A. Frank. *Scale invariance as a symmetry in physical and biological systems: listening to photons, bubbles and heartbeats*. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1323, pages 74–90. AIP, (2010).
- [74] N. J. Kasdin, *Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and 1/f-sup/spl alpha//power law noise generation*, Proceedings of the IEEE **83**, 802–827 (1995).
- [75] M. S. Keshner, *1/f noise*, Proceedings of the IEEE **70**, 212–218 (1982).
- [76] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, *Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise*, Physical review letters **59**, 381 (1987).
- [77] R. F. Voss, *Random fractals: Self-affinity in noise, music, mountains, and clouds*, Physica D: Nonlinear Phenomena **38**, 362–371 (1989).

- [78] W. H. Press, *Flicker noises in astronomy and elsewhere*, Comments on Astrophysics **7**, 103–119 (1978).
- [79] J. Timmer and M. König, *On generating power law noise.*, Astronomy and Astrophysics **300**, 707 (1995).
- [80] M. Priestley, *Spectral Estimation and Time Series*, San Diego (1989).
- [81] R. B. Davies and D. Harte, *Tests for Hurst effect*, Biometrika **74**, 95–101 (1987).
- [82] S. Muniandy and S. Lim, *Modeling of locally self-similar processes using multifractional Brownian motion of Riemann-Liouville type*, Physical Review E **63**, 046104 (2001).
- [83] B. B. Mandelbrot and J. W. Van Ness, *Fractional Brownian motions, fractional noises and applications*, SIAM review **10**, 422–437 (1968).
- [84] R. H. Lyon and G. Maidanik, *Power flow between linearly coupled oscillators*, The journal of the Acoustical Society of America **34**, 623–639 (1962).
- [85] A. Le Bot, *Entropy in sound and vibration: towards a new paradigm*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **473**, 20160602 (2017).
- [86] R. Patria. *Statistical Mechanics*, ButterworthHeinemann, (1997).
- [87] B. Fultz, *Vibrational thermodynamics of materials*, Progress in Materials Science **55**, 247–352 (2010).
- [88] C. L. Krumhansl, *Rhythm and pitch in music cognition.*, Psychological bulletin **126**, 159 (2000).
- [89] A. Adrian, A. Richard, F. K. Ann, and H. M. Robert. *Linguistics: An introduction to language and communication*, (2001).

- [90] D. J. Levitin, P. Chordia, and V. Menon, *Musical rhythm spectra from Bach to Joplin obey a  $1/f$  power law*, Proceedings of the National Academy of Sciences **109**, 3716–3720 (2012).
- [91] J. E. Cohen, *Information theory and music*, Behavioral Science **7**, 137–163 (1962).
- [92] W. Weaver, *Recent contributions to the mathematical theory of communication*, ETC: a review of general semantics , 261–281 (1953).
- [93] L. Meyer. *Emotion and Meaning in Music*. Chicago: U, (1956).
- [94] B. Manaris, J. Romero, P. Machado, D. Krehbiel, T. Hirzel, W. Pharr, and R. B. Davis, *Zipf’s law, music classification, and aesthetics*, Computer Music Journal **29**, 55–69 (2005).
- [95] M. Gardner, *White and brown music, fractal curves and one-over-f fluctuations*, Scientific american **238**, 16–27 (1978).
- [96] M. L. Chanda and D. J. Levitin, *The neurochemistry of music*, Trends in cognitive sciences **17**, 179–193 (2013).
- [97] N. Collins, *Musical form and algorithmic composition*, Contemporary Music Review **28**, 103–114 (2009).
- [98] J. Engel, C. Resnick, A. Roberts, S. Dieleman, M. Norouzi, D. Eck, and K. Simonyan. *Neural audio synthesis of musical notes with wavenet autoencoders*. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning-Volume 70*, pages 1068–1077. JMLR. org, (2017).
- [99] A. Roberts, J. Engel, C. Raffel, C. Hawthorne, and D. Eck, *A hierarchical latent vector model for learning long-term structure in music*, arXiv preprint arXiv:1803.05428 (2018).

- 
- [100] F. Pachet, P. Roy, A. Papadopoulos, and J. Sakellariou. *Generating  $1/f$  noise sequences as constraint satisfaction: the voss constraint*. In *Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (2015).
- [101] C. Horsman, S. Stepney, R. C. Wagner, and V. Kendon, *When does a physical system compute?*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **470**, 20140182 (2014).
- [102] S. Lloyd. *The universe as quantum computer*. In *A Computable Universe: Understanding and exploring Nature as computation*, pages 567–581. World Scientific, (2013).
- [103] C. E. Shannon, *A symbolic analysis of relay and switching circuits*, Electrical Engineering **57**, 713–723 (1938).
- [104] A. M. Turing, *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*, Proceedings of the London mathematical society **2**, 230–265 (1937).
- [105] W. Aspray, *John von Neumann and the origins of modern computing*, Mit Press Cambridge, MA (1990).
- [106] V. V. Zhirnov and R. K. Cavin, *Future microsystems for information processing: limits and lessons from the living systems*, IEEE Journal of the Electron Devices Society **1**, 29–47 (2013).
- [107] M. Ascher and R. Ascher, *Mathematics of the Incas: Code of the Quipu*, Courier Corporation (2013).
- [108] D. Swade, *Charles Babbage and his calculating engines*, Science Museum (1991).
- [109] G. Dodig Crnkovic and R. Giovagnoli. *Natural/unconventional computing and its philosophical significance*, (2012).

- 
- [110] C. Teuscher and A. Adamatzky, *Proceedings of the 2005 Workshop on Unconventional Computing: From Cellular Automata to Wetware*, Luniver Press (2005).
- [111] S. Stepney, *Programming unconventional computers: dynamics, development, self-reference*, *Entropy* **14**, 1939–1952 (2012).
- [112] S. Stepney, *Local and global models of physics and computation*, *International Journal of General Systems* **43**, 673–681 (2014).
- [113] M. M. Waldrop, *The chips are down for Moore’s law*, *Nature News* **530**, 144 (2016).
- [114] P. Doornbusch, *Computer sound synthesis in 1951: the music of CSIRAC*, *Computer Music Journal* **28**, 10–25 (2004).
- [115] I. Poupyrev, M. J. Lyons, S. Fels, et al. *New interfaces for musical expression*. In *CHI’01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 491–492. ACM, (2001).
- [116] E. R. Miranda, *Guide to Unconventional Computing for Music*, Springer (2017).
- [117] A. Ekárt, *Computational Intelligence in Music, Sound, Art and Design: 8th International Conference, EvoMUSART 2019, Held as Part of EvoStar 2019, Leipzig, Germany, April 24–26, 2019, Proceedings*, Springer (2019).
- [118] J. Von Neumann et al., *The general and logical theory of automata*, 1951 , 1–41 (1951).
- [119] J. Monod. *On chance and necessity*. In *Studies in the Philosophy of Biology*, pages 357–375. Springer, (1974).
- [120] M. Amos, *Genesis machines*, Atlantic Books Ltd (2014).
- [121] L. Grozinger, M. Amos, T. E. Gorochoowski, P. Carbonell, D. A. Oyarzún, R. Stoof, H. Fellermann, P. Zuliani, H. Tas, and A. Goñi-Moreno, *Pathways to cellular supremacy in biocomputing*, *Nature communications* **10**, 1–11 (2019).

- [122] L. M. Adleman, *Molecular computation of solutions to combinatorial problems*, Science , 1021–1024 (1994).
- [123] M. Amos, *Cellular computing*, Oxford University Press (2004).
- [124] W. C. Ruder, T. Lu, and J. J. Collins, *Synthetic biology moving into the clinic*, Science **333**, 1248–1252 (2011).
- [125] S. K. Lee, H. Chou, T. S. Ham, T. S. Lee, and J. D. Keasling, *Metabolic engineering of microorganisms for biofuels production: from bugs to synthetic biology to fuels*, Current opinion in biotechnology **19**, 556–563 (2008).
- [126] G. S. Sayler, M. L. Simpson, and C. D. Cox, *Emerging foundations: nano-engineering and bio-microelectronics for environmental biotechnology*, Current opinion in microbiology **7**, 267–273 (2004).
- [127] A. Levskaya, A. A. Chevalier, J. J. Tabor, Z. B. Simpson, L. A. Lavery, M. Levy, E. A. Davidson, A. Scouras, A. D. Ellington, E. M. Marcotte, et al., *Synthetic biology: engineering Escherichia coli to see light*, Nature **438**, 441 (2005).
- [128] S. Basu, Y. Gerchman, C. H. Collins, F. H. Arnold, and R. Weiss, *A synthetic multicellular system for programmed pattern formation*, Nature **434**, 1130 (2005).
- [129] T. Sohka, R. A. Heins, and M. Ostermeier, *Morphogen-defined patterning of Escherichia coli enabled by an externally tunable band-pass filter*, Journal of biological engineering **3**, 10 (2009).
- [130] G. Rozenberg, T. Bäck, and J. N. Kok, *Handbook of natural computing*, Springer (2012).
- [131] F. Crick, *Central dogma of molecular biology*, Nature **227**, 561 (1970).
- [132] F. Jacob and J. Monod, *Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins*, Journal of molecular biology **3**, 318–356 (1961).

- [133] A. Klug, *Rosalind Franklin and the discovery of the structure of DNA*, Nature **219**, 808 (1968).
- [134] T. S. Gardner, C. R. Cantor, and J. J. Collins, *Construction of a genetic toggle switch in Escherichia coli*, Nature **403**, 339 (2000).
- [135] J. Garcia-Ojalvo, M. B. Elowitz, and S. H. Strogatz, *Modeling a synthetic multicellular clock: repressilators coupled by quorum sensing*, Proceedings of the National Academy of Sciences **101**, 10955–10960 (2004).
- [136] R. P. Feynman, *Feynman lectures on computation*, CRC Press (2018).
- [137] S. Strogatz, *Sync: The emerging science of spontaneous order*, Penguin UK (2004).
- [138] B. C. Goodwin, *Oscillatory behavior in enzymatic control processes*, Advances in enzyme regulation **3**, 425–437 (1965).
- [139] B. C. Goodwin et al., *Temporal organization in cells. A dynamic theory of cellular control processes.*, Temporal organization in cells. A dynamic theory of cellular control processes. (1963).
- [140] D. T. Gillespie, *Stochastic simulation of chemical kinetics*, Annu. Rev. Phys. Chem. **58**, 35–55 (2007).
- [141] O. Purcell, N. J. Savery, C. S. Grierson, and M. Di Bernardo, *A comparative analysis of synthetic genetic oscillators*, Journal of The Royal Society Interface **7**, 1503–1524 (2010).
- [142] N. Barkai and S. Leibler, *Biological rhythms: Circadian clocks limited by noise*, Nature **403**, 267 (2000).
- [143] M. B. Elowitz and S. Leibler, *A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators*, Nature **403**, 335 (2000).

- [144] S. Müller, J. Hofbauer, L. Endler, C. Flamm, S. Widder, and P. Schuster, *A generalized model of the repressilator*, *Journal of mathematical biology* **53**, 905–937 (2006).
- [145] T. Danino, O. Mondragón-Palomino, L. Tsimring, and J. Hasty, *A synchronized quorum of genetic clocks*, *Nature* **463**, 326 (2010).
- [146] D. McMillen, N. Kopell, J. Hasty, and J. Collins, *Synchronizing genetic relaxation oscillators by intercell signaling*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**, 679–684 (2002).
- [147] J. Stricker, S. Cookson, M. R. Bennett, W. H. Mather, L. S. Tsimring, and J. Hasty, *A fast, robust and tunable synthetic gene oscillator*, *Nature* **456**, 516 (2008).
- [148] W. S. Rasband et al. *ImageJ*, (1997).
- [149] T. Hermann, A. Hunt, and J. G. Neuhoff, *The sonification handbook*, Logos Verlag Berlin (2011).
- [150] F. Grond and J. Berger. *Parameter mapping sonification*. In *The sonification handbook*. (2011).
- [151] T. Mahajan and K. Rai, *A novel optogenetically tunable frequency modulating oscillator*, *PloS one* **13** (2018).
- [152] L. Potvin-Trottier, N. D. Lord, G. Vinnicombe, and J. Paulsson, *Synchronous long-term oscillations in a synthetic gene circuit*, *Nature* **538**, 514–517 (2016).
- [153] D. R. Lovley, *Electromicrobiology*, *Annual review of microbiology* **66**, 391–409 (2012).
- [154] D. R. Lovley, *Bug juice: harvesting electricity with microorganisms*, *Nature Reviews Microbiology* **4**, 497–508 (2006).

- [155] N. S. Malvankar, M. Vargas, K. P. Nevin, A. E. Franks, C. Leang, B.-C. Kim, K. Inoue, T. Mester, S. F. Covalla, J. P. Johnson, et al., *Tunable metallic-like conductivity in microbial nanowire networks*, *Nature nanotechnology* **6**, 573–579 (2011).
- [156] P.-L. Tremblay, M. Aklujkar, C. Leang, K. P. Nevin, and D. Lovley, *A genetic system for Geobacter metallireducens: role of the flagellin and pilin in the reduction of Fe (III) oxide*, *Environmental microbiology reports* **4**, 82–88 (2012).
- [157] I. Willner and E. Katz, *Bioelectronics: from theory to applications*, John Wiley & Sons (2006).
- [158] M. A. TerAvest, Z. Li, and L. T. Angenent, *Bacteria-based biocomputing with Cellular Computing Circuits to sense, decide, signal, and act*, *Energy & Environmental Science* **4**, 4907–4916 (2011).
- [159] A. Pikovsky and M. Rosenblum, *Synchronization*, *Scholarpedia* **2**, 1459 (2007).
- [160] B. M. B. Bailey, *Kaempfer Restor'd*, *Monumenta Nipponica* , 1–33 (1988).
- [161] J. Buck and E. Buck, *Mechanism of rhythmic synchronous flashing of fireflies*, *Science* **159**, 1319–1327 (1968).
- [162] A. Prindle, P. Samayoa, I. Razinkov, T. Danino, L. S. Tsimring, and J. Hasty, *A sensing array of radically coupled genetic/biopixels/*, *Nature* **481**, 39–44 (2012).
- [163] A. T. Winfree, *Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators*, *Journal of theoretical biology* **16**, 15–42 (1967).
- [164] , *Y. Kuramoto: Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*, Springer-Verlag, Berlin and New York, 1984, viii+ 156 , 25× 17cm, 9,480 (Springer Series in Synergetics, Vol. 19)., **40**, 817–818 (1985).

- [165] H. Hong, H. Park, and M. Choi, *Collective synchronization in spatially extended systems of coupled oscillators with random frequencies*, Physical Review E **72**, 036217 (2005).
- [166] H. Hong, M.-Y. Choi, and B. J. Kim, *Synchronization on small-world networks*, Physical Review E **65**, 026139 (2002).
- [167] A. Pikovsky and M. Rosenblum, *Dynamics of globally coupled oscillators: Progress and perspectives*, Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science **25**, 097616 (2015).
- [168] A. Franci, M. A. Herrera-Valdez, M. Lara-Aparicio, and P. Padilla-Longoria, *Synchronization, oscillator death, and frequency modulation in a class of biologically inspired coupled oscillators*, Frontiers in Applied Mathematics and Statistics **4**, 51 (2018).
- [169] M. Lara-Aparicio, C. Barriga-Montoya, P. Padilla-Longoria, and B. Fuentes-Pardo, *Modeling some properties of circadian rhythms*, Mathematical Biosciences & Engineering **11**, 317 (2014).
- [170] T. E. Lee and H. Sadeghpour, *Quantum synchronization of quantum van der Pol oscillators with trapped ions*, Physical review letters **111**, 234101 (2013).
- [171] H. P. Langtangen and S. Linge, *Finite difference computing with PDEs: a modern software approach*, Springer (2017).
- [172] M. Shelley, *frankenstein*, Broadview Press (2012).
- [173] D. Haraway, *Simians, cyborgs, and women: The reinvention of nature*, Routledge (2013).
- [174] D. Haraway, *A manifesto for cyborgs: Science, technology, and socialist feminism in the 1980s*, Feminism/postmodernism , 190–233 (1990).

- [175] F. J. Dyson, *Time without end: Physics and biology in an open universe*, Reviews of Modern Physics **51**, 447 (1979).
- [176] F. J. Dyson, *Life in the universe: Is life digital or analogue*, The Far-Future Universe: Eschatology from a Cosmic Perspective , 140–157 (1999).
- [177] J. Kepler et al., *De nive sexangula*, Oxford: Clarendon Press **1611**, 25 (1938).
- [178] J. B. Martin, S. Astin, and D. J. Reading, *Snowflake Bentley*, Houghton Mifflin Boston, MA (1998).
- [179] A. M. Turing, *The chemical basis of morphogenesis*, Bulletin of mathematical biology **52**, 153–197 (1990).
- [180] E. Ben-Jacob and P. Garik, *The formation of patterns in non-equilibrium growth*, Nature **343**, 523–530 (1990).
- [181] E. Ben-Jacob, *From snowflake formation to growth of bacterial colonies: Part I. Diffusive patterning in azoic systems*, Contemporary Physics **34**, 247–273 (1993).
- [182] E. Ben-Jacob and H. Levine, *The artistry of nature*, Nature **409**, 985 (2001).
- [183] H. Fujikawa and M. Matsushita, *Fractal growth of Bacillus subtilis on agar plates*, Journal of the physical society of japan **58**, 3875–3878 (1989).
- [184] M. Matsushita and H. Fujikawa, *Diffusion-limited growth in bacterial colony formation*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **168**, 498–506 (1990).
- [185] H. Fujikawa and M. Matsushita, *Bacterial fractal growth in the concentration field of nutrient*, Journal of the Physical Society of Japan **60**, 88–94 (1991).
- [186] H. Tronolone, A. Tam, Z. Szenczi, J. Green, S. Balasuriya, E. L. Tek, J. M. Gardner, J. F. Sundstrom, V. Jiranek, S. G. Oliver, et al., *Diffusion-limited growth of microbial colonies*, Scientific reports **8**, 1–11 (2018).

- [187] E. Ben-Jacob, H. Shmueli, O. Shochet, and A. Tenenbaum, *Adaptive self-organization during growth of bacterial colonies*, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **187**, 378–424 (1992).
- [188] E. Ben-Jacob, O. Schochet, A. Tenenbaum, I. Cohen, A. Czirok, and T. Vicsek, *Generic modelling of cooperative growth patterns in bacterial colonies*, *Nature* **368**, 46–49 (1994).
- [189] E. Ben-Jacob, I. Cohen, and H. Levine, *Cooperative self-organization of microorganisms*, *Advances in Physics* **49**, 395–554 (2000).
- [190] M. Tcherpakov, E. Ben-Jacob, and D. L. Gutnick, *Paenibacillus dendritiformis sp. nov., proposal for a new pattern-forming species and its localization within a phylogenetic cluster*, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **49**, 239–246 (1999).
- [191] E. Ben-Jacob, I. Cohen, and D. L. Gutnick, *Cooperative organization of bacterial colonies: from genotype to morphotype*, *Annual review of microbiology* **52**, 779–806 (1998).
- [192] E. Ben-Jacob, O. Shochet, A. Tenenbaum, I. Cohen, A. Czirók, and T. Vicsek, *Communication, regulation and control during complex patterning of bacterial colonies*, *Fractals* **2**, 15–44 (1994).
- [193] R. Popa, *Between necessity and probability: searching for the definition and origin of life*, Springer Science & Business Media (2004).
- [194] J. B. Stock, A. M. Stock, and J. M. Mottonen, *Signal transduction in bacteria*, *Nature* **344**, 395–400 (1990).
- [195] M. Eisenbach, *Functions of the flagellar modes of rotation in bacterial motility and chemotaxis*, *Molecular microbiology* **4**, 161–167 (1990).

- [196] E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shochet, A. Tenenbaum, A. Czirók, and T. Vicsek, *Cooperative formation of chiral patterns during growth of bacterial colonies*, Physical review letters **75**, 2899 (1995).
- [197] G. Tempesti. *A new self-reproducing cellular automaton capable of construction and computation*. In *European Conference on Artificial Life*, pages 555–563. Springer, (1995).
- [198] E. Ben-Jacob and H. Levine, *Self-engineering capabilities of bacteria*, Journal of the Royal Society Interface **3**, 197–214 (2006).
- [199] E. Ben-Jacob, *Bacterial self-organization: co-enhancement of complexification and adaptability in a dynamic environment*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **361**, 1283–1312 (2003).
- [200] M. E. Taga and B. L. Bassler, *Chemical communication among bacteria*, Proceedings of the National Academy of Sciences **100**, 14549–14554 (2003).
- [201] M. Ptashne and A. Gann, *Genes & signals*, Cold Spring Harbor Laboratory Press Cold Spring Harbor, NY: (2002).
- [202] D. B. Searls, *The language of genes*, Nature **420**, 211–217 (2002).
- [203] E. B. Jacob, I. Becker, Y. Shapira, and H. Levine, *Bacterial linguistic communication and social intelligence*, TRENDS in Microbiology **12**, 366–372 (2004).
- [204] G. Reguera, *When microbial conversations get physical*, Trends in microbiology **19**, 105–113 (2011).
- [205] A. Gurwitsch, *Die natur des spezifischen erregers der zellteilung*, Archiv für mikroskopische Anatomie und Entwicklungsmechanik **100**, 11–40 (1923).

- [206] M. V. Trushin, *Studies on distant regulation of bacterial growth and light emission*, Microbiology **149**, 363–368 (2003).
- [207] D. Fels, *Cellular communication through light*, PLoS one **4** (2009).
- [208] G. Reguera, K. D. McCarthy, T. Mehta, J. S. Nicoll, M. T. Tuominen, and D. R. Lovley, *Extracellular electron transfer via microbial nanowires*, Nature **435**, 1098–1101 (2005).
- [209] G. Reguera, K. P. Nevin, J. S. Nicoll, S. F. Covalla, T. L. Woodard, and D. R. Lovley, *Biofilm and nanowire production leads to increased current in Geobacter sulfurreducens fuel cells*, Appl. Environ. Microbiol. **72**, 7345–7348 (2006).
- [210] A. Prindle, J. Liu, M. Asally, S. Ly, J. Garcia-Ojalvo, and G. M. Süel, *Ion channels enable electrical communication in bacterial communities*, Nature **527**, 59–63 (2015).
- [211] M. V. Trushin, *The possible role of electromagnetic fields in bacterial communication*, Journal of Microbiology, Immunology and Infection **36**, 153–160 (2003).
- [212] M. MATSUHASHI, A. N. PANKRUSHINA, K. ENDOH, H. WATANABE, H. OHSHIMA, M. TOBI, S. ENDO, Y. MANO, M. HYODO, T. KANEKO, et al., *Bacillus carboniphilus cells respond to growth-promoting physical signals from cells of homologous and heterologous bacteria*, The Journal of General and Applied Microbiology **42**, 315–323 (1996).
- [213] M. Matsushashi, A. N. Pankrushina, S. Takeuchi, H. Ohshima, H. Miyoi, K. Endoh, K. Murayama, H. Watanabe, S. Endo, M. Tobi, et al., *Production of sound waves by bacterial cells and the response of bacterial cells to sound*, The Journal of general and applied microbiology **44**, 49–55 (1998).
- [214] P. S. Hill, M. Virant-Doberlet, and A. Wessel. *What Is Biotremology?* In *Biotremology: Studying Vibrational Behavior*, pages 15–25. Springer, (2019).

- [215] M. Gagliano, *Green symphonies: a call for studies on acoustic communication in plants*, Behavioral Ecology **24**, 789–796 (2013).
- [216] A. P. Bos, *Aristotle on the differences between plants, animals, and human beings and on the elements as instruments of the soul (De Anima 2.4. 415b18)*, The Review of Metaphysics , 821–841 (2010).
- [217] C. D. Cox, N. Bavi, and B. Martinac, *Bacterial mechanosensors*, Annual review of physiology **80**, 71–93 (2018).
- [218] A. Persat, C. D. Nadell, M. K. Kim, F. Ingremeau, A. Siryaporn, K. Drescher, N. S. Wingreen, B. L. Bassler, Z. Gitai, and H. A. Stone, *The mechanical world of bacteria*, Cell **161**, 988–997 (2015).
- [219] W. Muir, A. Hildebrandt, and A. Riker, *Plant tissue cultures produced from single isolated cells*, Science **119**, 877–878 (1954).
- [220] S. Endo, S. Takayanagi, S. Kikuma, E. Masaka, and N. Hiraoka, *Refinement of the method for research on biosonics, sonic wave regulation of cell growth: Use of a turntable to balance the external effects such as oscillatory energies*, Nippon Nōgei Kagakukaishi **73**, 1173–1180 (1999).
- [221] J. L. Ying, J. Dayou, and C. K. Phin, *Experimental investigation on the effects of audible sound to the growth of Escherichia coli*, Modern Applied Science **3**, 124–127 (2009).
- [222] S. Gu, Y. Zhang, and Y. Wu, *Effects of sound exposure on the growth and intracellular macromolecular synthesis of E. coli k-12*, PeerJ **4**, e1920 (2016).
- [223] A. Shah, A. Raval, and V. Kothari, *Sound stimulation can influence microbial growth and production of certain key metabolites*, Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences **9**, 330–334 (2020).

- [224] C. Joshi, P. Patel, A. Singh, J. Sukhadiya, V. Shah, and V. Kothari, *Frequency-dependent response of Chromobacterium violaceum to sonic stimulation, and altered gene expression associated with enhanced violacein production at 300 Hz*, bioRxiv , 098186 (2017).
- [225] S. Banerjee, A. Goswami, A. Datta, A. Pyne, A. Nikhat, and B. Ghosh, *Effect of Different Sound Frequencies on the Growth and Antibiotic Susceptibility of Escherichia coli*, Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci **7**, 1931–1939 (2018).
- [226] R. B. M. Aggio, V. Obolonkin, and S. G. Villas-Bôas, *Sonic vibration affects the metabolism of yeast cells growing in liquid culture: a metabolomic study*, Metabolomics **8**, 670–678 (2012).
- [227] S. L. Liu, W. J. Wu, and P. T. Yung, *Effect of sonic stimulation on Bacillus endospore germination*, FEMS microbiology letters **363**, fnv217 (2016).
- [228] T. J. Cox, *The Acoustic Emissions Produced by Escherichia Coli During the Growth Cycle*, (2014).
- [229] L. Meng, *Acoustic Emission of Lactococcus lactis ssp. lactis C2 Infected with Three Bacteriophages c2, sk1 and ml3*, (2016).
- [230] N. Sarvaiya and V. Kothari, *Effect of audible sound in form of music on microbial growth and production of certain important metabolites*, Microbiology **84**, 227–235 (2015).
- [231] K. C. Huang, Y. Meir, and N. S. Wingreen, *Dynamic structures in Escherichia coli: spontaneous formation of MinE rings and MinD polar zones*, Proceedings of the National Academy of Sciences **100**, 12724–12728 (2003).
- [232] P. L. Graumann, *Dynamics of bacterial cytoskeletal elements*, Cell motility and the cytoskeleton **66**, 909–914 (2009).

- [233] K. Haase and A. E. Pelling, *Investigating cell mechanics with atomic force microscopy*, Journal of The Royal Society Interface **12**, 20140970 (2015).
- [234] A. E. Pelling, S. Sehati, E. B. Gralla, J. S. Valentine, and J. K. Gimzewski, *Local nanomechanical motion of the cell wall of *Saccharomyces cerevisiae**, Science **305**, 1147–1150 (2004).
- [235] V. Norris and G. J. Hyland, *Do bacteria sing? Sonic intercellular communication between bacteria may reflect electromagnetic intracellular communication involving coherent collective vibrational modes that could integrate enzyme activities and gene expression*, Molecular microbiology **24**, 879–880 (1997).
- [236] A. Anishkin and C. Kung, *Microbial mechanosensation*, Current opinion in neurobiology **15**, 397–405 (2005).
- [237] S. Shrivastava and M. F. Schneider, *Evidence for two-dimensional solitary sound waves in a lipid controlled interface and its implications for biological signalling*, Journal of The Royal Society Interface **11**, 20140098 (2014).
- [238] M. B. Miller and B. L. Bassler, *Quorum sensing in bacteria*, Annual Reviews in Microbiology **55**, 165–199 (2001).
- [239] J. N. Wilking, T. E. Angelini, A. Seminara, M. P. Brenner, and D. A. Weitz, *Biofilms as complex fluids*, MRS bulletin **36**, 385–391 (2011).
- [240] I. Golding, Y. Kozlovsky, I. Cohen, and E. Ben-Jacob, *Studies of bacterial branching growth using reaction–diffusion models for colonial development*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **260**, 510–554 (1998).
- [241] J. A. Stotsky, J. F. Hammond, L. Pavlovsky, E. J. Stewart, J. G. Younger, M. J. Solomon, and D. M. Bortz, *Variable viscosity and density biofilm simulations using an immersed boundary method, part II: Experimental validation and the heterogeneous rheology-IBM*, Journal of Computational Physics **317**, 204–222 (2016).

- [242] S. G. Charlton, M. A. White, S. Jana, L. E. Eland, P. G. Jayathilake, J. G. Burgess, J. Chen, A. Wipat, and T. P. Curtis. *Regulating, measuring, and modeling the viscoelasticity of bacterial biofilms*, (2019).
- [243] E. Alpkvist, C. Picioreanu, M. C. van Loosdrecht, and A. Heyden, *Three-dimensional biofilm model with individual cells and continuum EPS matrix*, *Biotechnology and bioengineering* **94**, 961–979 (2006).
- [244] R. Christensen, *Theory of viscoelasticity: an introduction*, Elsevier (2012).
- [245] S. Kesel, B. von Bronk, C. F. García, A. Götz, O. Lieleg, and M. Opitz, *Matrix composition determines the dimensions of Bacillus subtilis NCIB 3610 biofilm colonies grown on LB agar*, *RSC advances* **7**, 31886–31898 (2017).
- [246] S. Volkov and A. Kosevich, *Theory of low-frequency vibrations in DNA macromolecules*, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics* **8**, 1069–1083 (1991).
- [247] V. Lisỳ, P. Miškovský, and P. Schreiber, *On a simple model of low-frequency vibrations in DNA macromolecules*, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics* **13**, 707–716 (1996).
- [248] B. Mortimer, S. D. Gordon, C. Holland, C. R. Siviour, F. Vollrath, and J. F. Windmill, *The speed of sound in silk: linking material performance to biological function*, *Advanced Materials* **26**, 5179–5183 (2014).
- [249] Y. Sun, C. Wang, and J. Dai, *Biophotons as neural communication signals demonstrated by in situ biophoton autography*, *Photochemical & Photobiological Sciences* **9**, 315–322 (2010).
- [250] C. Marletto, D. Coles, T. Farrow, and V. Vedral, *Entanglement between living bacteria and quantized light witnessed by Rabi splitting*, *Journal of Physics Communications* **2**, 101001 (2018).

- 
- [251] D. I. Radin and R. D. Nelson, *Evidence for consciousness-related anomalies in random physical systems*, Foundations of Physics **19**, 1499–1514 (1989).
- [252] C. Huygens, *Œuvres complètes de Christiaan Huygens publiées par la Société hollandaise des sciences...*, M. Nijhoff (1897).
- [253] N. Wiener, *Nonlinear problems in random theory*, Nonlinear Problems in Random Theory, by Norbert Wiener, pp. 142. ISBN 0-262-73012-X. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press, August 1966.(Paper) , 142 (1966).
- [254] Y. Kuramoto. *Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators*. In *International symposium on mathematical problems in theoretical physics*, pages 420–422. Springer, (1975).
- [255] Y. Kuramoto and D. Battogtokh, *Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators*, arXiv preprint cond-mat/0210694 (2002).
- [256] D. M. Abrams, R. Mirollo, S. H. Strogatz, and D. A. Wiley, *Solvable model for chimera states of coupled oscillators*, Physical review letters **101**, 084103 (2008).
- [257] D. M. Abrams and S. H. Strogatz, *Chimera states in a ring of nonlocally coupled oscillators*, International Journal of Bifurcation and Chaos **16**, 21–37 (2006).
- [258] P. R. Carvalho and M. A. Savi, *Synchronization and chimera state in a mechanical system*, Nonlinear Dynamics , 1–19 (2020).
- [259] A. M. Hagerstrom, T. E. Murphy, R. Roy, P. Hövel, I. Omelchenko, and E. Schöll, *Experimental observation of chimeras in coupled-map lattices*, Nature Physics **8**, 658–661 (2012).
- [260] M. R. Tinsley, S. Nkomo, and K. Showalter, *Chimera and phase-cluster states in populations of coupled chemical oscillators*, Nature Physics **8**, 662–665 (2012).

- [261] E. A. Martens, S. Thutupalli, A. Fourrière, and O. Hallatschek, *Chimera states in mechanical oscillator networks*, Proceedings of the National Academy of Sciences **110**, 10563–10567 (2013).
- [262] J. Wojewoda, K. Czołczynski, Y. Maistrenko, and T. Kapitaniak, *The smallest chimera state for coupled pendula*, Scientific reports **6**, 1–5 (2016).
- [263] J. P. Clendinning, *The pattern-mechanico compositions of György Ligeti*, Perspectives of New Music , 192–234 (1993).
- [264] A. S. Szalay, J. Gray, A. R. Thakar, P. Z. Kunszt, T. Malik, J. Raddick, C. Stoughton, and J. vandenBerg. *The SDSS skyserver: public access to the sloan digital sky server data*. In *Proceedings of the 2002 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, pages 570–581, (2002).
- [265] T. Sousbie, C. Pichon, and H. Kawahara, *The persistent cosmic web and its filamentary structure–II. Illustrations*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **414**, 384–403 (2011).
- [266] K. Kraljic, S. Arnouts, C. Pichon, C. Laigle, S. de La Torre, D. Vibert, C. Cadiou, Y. Dubois, M. Treyer, C. Schimd, et al., *Galaxy evolution in the metric of the cosmic web*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **474**, 547–571 (2018).
- [267] M. Cautun, R. Van De Weygaert, B. J. Jones, and C. S. Frenk, *Evolution of the cosmic web*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **441**, 2923–2973 (2014).
- [268] Y. B. Zel’Dovich, *Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations.*, Astronomy and astrophysics **5**, 84–89 (1970).
- [269] W. Hu and S. Dodelson, *Cosmic microwave background anisotropies*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **40**, 171–216 (2002).

- [270] D. J. Eisenstein and C. L. Bennett, *Cosmic sound waves rule*, *Physics Today* **61**, 44–50 (2008).
- [271] M. Giovannini, *Why CMB physics?*, *International Journal of Modern Physics A* **22**, 2697–2894 (2007).
- [272] D. Baumann, *On the quantum origin of structure in the inflationary universe*, arXiv preprint arXiv:0710.3187 (2007).
- [273] R. H. Brandenberger, *Alternatives to cosmological inflation*, arXiv preprint arXiv:0902.4731 (2009).
- [274] F. M. Fernández, *On the spectra of coupled harmonic oscillators*, arXiv preprint arXiv:2003.05538 (2020).
- [275] C. Weedbrook, S. Pirandola, R. García-Patrón, N. J. Cerf, T. C. Ralph, J. H. Shapiro, and S. Lloyd, *Gaussian quantum information*, *Reviews of Modern Physics* **84**, 621 (2012).
- [276] T. E. Lee, C.-K. Chan, and S. Wang, *Entanglement tongue and quantum synchronization of disordered oscillators*, *Physical Review E* **89**, 022913 (2014).
- [277] V. Ameri, M. Eghbali-Arani, A. Mari, A. Farace, F. Kheirandish, V. Giovannetti, and R. Fazio, *Mutual information as an order parameter for quantum synchronization*, *Physical Review A* **91**, 012301 (2015).
- [278] V. M. Bastidas, I. Omelchenko, A. Zakharova, E. Schöll, and T. Brandes. *Chimera states in quantum mechanics*. In *Control of Self-Organizing Nonlinear Systems*, pages 315–336. Springer, (2016).
- [279] A. Merdaci and A. Jellal, *Entanglement in three coupled harmonic oscillators*, *Physics Letters A* **384**, 126134 (2020).

- 
- [280] M. Jonker. *Entanglement entropy of coupled harmonic oscillators: an approach in Fock space*. Master's thesis, (2016).
- [281] J. Steinhauer, *Observation of self-amplifying Hawking radiation in an analogue black-hole laser*, Nature Physics **10**, 864 (2014).
- [282] J. Weenink and T. Prokopec, *On decoherence of cosmological perturbations and stochastic inflation*, arXiv preprint arXiv:1108.3994 (2011).
- [283] A. Mazumdar, *The origin of dark matter, matter-anti-matter asymmetry, and inflation*, arXiv preprint arXiv:1106.5408 (2011).
- [284] E. W. Kolb, *Early-Universe Issues: Seeds of Perturbations and Birth of Dark Matter*, Physica Scripta **2000**, 231 (2000).