



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE MÚSICA

JARDINES ALQUÍMICOS
CREACIÓN ASISTIDA POR COMPUTADORAS QUÍMICAS

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN COMPOSICIÓN
QUE PRESENTA
JAIME ALONSO LOBATO CARDOSO

DIRECTOR DE TESIS
DR. PABLO PADILLA LONGORIA



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.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN406620: Artefactos y autómatas. Modelos matemáticos, arte y filosofía. Del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS-UNAM).

A mis padres.

“Hubo un tiempo en el que la realidad era una especie de sopa de quarks más o menos homogénea. Pero basta un vistazo a nuestro alrededor para convencernos de que las cosas se han complicado. Hay objetos en los que predomina la materia, como una gota de agua o un puñado de arena. Hay objetos en los que predomina la energía, como un rayo de sol o el entorno de un imán. Y hay objetos en los que predomina la información, como un pedazo de ADN o un poema.”

Jorge Wagensberg. La Rebelión de las Formas.

Agradecimientos

Hay artistas que trabajan durante toda su vida dedicados a desarrollar una voz que los identifique del resto de artistas de su generación produciendo el *corpus* de su obra en el medio que mejor les permita expresarse; yo cambio de medio como de calzones, sonido, bacterias, video, arcilla, concreto, fuego, microscopios, plástico, gráfica digital, bacterias, espejos, agua, live coding, ADN, funciones matemáticas, láseres, sensores, fotografía, reacciones químicas, etc. Me la paso olfateando potencial poético en la realidad que me rodea y después busco la mejor manera de compartir la experiencia estética con el público, y si además de la materia no sé absolutamente nada me emociona mucho más porque eso me hace un ignorante, me ayuda a ver mi meta como un embrujo chamánico al que habrá que llegar a partir de aprender de los demás, me convierto en un detective salvaje y me aviento al vacío. Si tuviera que poner una especialidad en mi cv sería la de neófito profesional.

Varios de los medios antes mencionados fueron ocupados en este proyecto de largo aliento, es por eso que este proyecto no hubiera podido ser posible sin la ayuda de un número enorme de personas e instituciones a las cuales agradeceré en este apartado de manera brevísima, pero no por eso menos sentida.

En primer lugar, al Dr. Pablo Padilla Longoria, gran amigo, aliado creativo y mentor, por avivar la mecha del descubrimiento científico en mi, parte del alquimista que escribe esta tesis te la debo a ti y nunca podré acabar de agradecértelo. A mi socio y amigo el Maestro en Ciencias Román Alfonso Castillo Díaz, por acompañarme en el camino del anarquismo epistemológico y el biohacking, espantar investigadores del SNI con emancipación del ADN nunca fue tan divertido. Y con un sentido abrazo hasta el infinito a la Dra. María Olga Sáenz González, que en paz descanse.

A todo el equipo del Centro Multimedia, pero sobre todo a Adriana Casas por la complicidad, amistad y empuje para con el proyecto. Y a mi querido amigo David

Camargo, pintor de conceptos y terrorista de la imagen en movimiento, por la crítica pertinente a los “nuevos medios” y las largas invocaciones a los “nuevos contenidos”. A Marcela Armas, Arcángelo Constantini y al equipo de *Meditatio Sonus* por poner las condiciones para producir una de las obras que significa la mayor contribución de mi proyecto a las artes.

Al Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS-UNAM) por ser mi casa adoptiva y el refugio de este matemático lírico. Al Laboratorio de Biología Molecular y Genómica de la Facultad de Ciencias de la UNAM y su directora la Dr. Claudia Segal por su amable recibimiento y confianza. Al Laboratorio de Biofísica Funcional de la Facultad de Ciencias de la UNAM, a la Dra. Hortensia González y la Maestra en Ciencias Alicia Falcón por compartir tanto. A la memoria de Manrico Montero por haber creído en este proyecto, por las charlas y los consejos, mucha luz a donde quiera que estés. Y a Fabiola Larios por haber sido mi compañera en la producción de las obras.

Y de manera honoraria a Alexandra Elbakyan, científica pirata de Kazajistán y su proyecto <https://sci-hub.st/>, que ayuda a investigadores independientes como yo a robarse las publicaciones científicas de la mafia editorial. Sin esta página web realizar esta tesis me hubiera costado alrededor de \$50,000.00 pesos mexicanos ¡Por una ciencia sin candados, abierta, democratizadora y emancipadora!

Y a todas las personas que me han brindado su amor, gracias.

Índice

1. Fundamentos computacionales.
 - 1.1 Cómputos no convencionales.
 - 1.2 Cómputos de sustrato biológico
 - 1.2.1 Máquinas de Physarum Polycephalum (PhyChips)
 - 1.2.2 Máquinas de Bacterias (chips genéticos)
2. Computadoras químicas
 - 2.1 Computadoras líquidas
 - 2.2 Computadoras de reacción-difusión
 - 2.3 Computadoras basadas en colisiones
 - 2.4 Reacción Belousov-Zhabotinsky
 - 2.4.1 Historia
 - 2.4.2 Reactivos
 - 2.4.3 Protocolo de preparación de la reacción Belousov-Zhabotinsky
 - 2.4.4 Preparación de la reacción
 - 2.4.5 Funcionamiento de la reacción e interacción de sus elementos
3. Jardines Alquímicos. Creación asistida por computadoras químicas
 - 3.1 Propuesta de implementación de computadoras químicas
 - 3.2 Sistema de captura
 - 3.3 Producción de obra sonora
 - 3.3.1 JazzCodes VII: --... ..-.-. --.
 - 3.3.1.1 Descripción general de la obra
 - 3.3.1.2 Red neuronal no lineal de sustrato químico
 - 3.3.1.3 Extracción y análisis de datos
 - 3.3.1.4 Organización formal de la obra
 - 3.3.2 Lux Æterna
 - 3.3.2.1 Descripción general de la obra
 - 3.3.2.2 Algoritmo de video digital
 - 3.3.2.3 Oscilador Belousov-Zhabotinsky en placa de policarbonato
 - 3.3.2.4 Algoritmo binaural, sonido estéreo
 - 3.3.3 Île
 - 3.3.3.1 Descripción general de la obra
 - 3.3.3.2 Composición sonora
 - 3.3.3.3 Activación performática
 - 3.3.4 Todos los Relojes del Mundo
 - 3.3.5 Secuenciador BZ
 - 3.3.5.1 Hacia una teoría general de los secuenciadores
4. Conclusión

Introducción

A través de toda la historia del arte podemos encontrar una estrecha relación entre la creación y el desarrollo tecnológico. Ya sea que una nueva necesidad estética empuje la investigación y desarrollo de alguna tecnología, o que la apropiación de una herramienta tecnológica abra un nuevo mundo de posibilidades para el arte; el quehacer musical no está exento de esta tradición, no solo la composición es asistida por la tecnología, la laudería, la interpretación y el análisis también se han apoyado de diversas maneras en las ciencias y sus desarrollos tecnológicos.

Esta tesis trata acerca de la computadora como herramienta de apoyo para la composición musical, una tradición que tiene más de 60 años tal cual la conocemos, e inclusive podemos rastrear antecedentes hasta la edad media, si tomamos en cuenta las estrategias formales asociadas a la composición algorítmica de Guido d'Arezzo. (Miranda, 2001)

La investigación sobre la relación música-computadora impacta a todo el quehacer musical en su conjunto debido a que está presente en todos los campos de especialización de este arte y no está limitada solamente a un periodo histórico o estilo musical. Por ejemplo, los métodos de inteligencia artificial conocidos como aprendizaje de máquina aplicados a la musicología en compositores del barroco o renacimiento. Los softwares de física de materiales aplicados al estudio de instrumentos prehispánicos. Los softwares de edición de partituras que pueden ser utilizados para producir obras de cualquier estilo musical, desde el más antiguo, hasta el más contemporáneo, etc. Por lo que la relevancia de este tema de investigación se hace evidente.

Una de las motivaciones principales para escribir esta tesis es poder clarificar los conceptos de computadoras de sustrato biológico con particular énfasis en las computadoras químicas, así como su aplicación en proyectos de composición musical, arte sonoro y multimedia. Esto porque he encontrado un fuerte rechazo y

concepción equivocada de los mismos en los circuitos en los que me desenvuelvo como artista (como en la comunidad de *Live Coding*, por ejemplo), e incluso en círculos académicos de físicos, matemáticos o de ciencias de la computación no se conocen estos avances y se les sigue confundiendo con cómputos bioinspirados.

Antecedentes

Jardines Alquímicos. Creación asistida por computadoras químicas, es un proyecto transdisciplinario de creación artística que mezcla varias ramas del conocimiento humano alrededor del concepto de computadoras químicas. Conceptos como composición algorítmica, live coding, arte generativo, cómputos no convencionales, química no lineal y biomatemáticas serán parte fundamental de esta tesis y las iremos describiendo en su aplicación a la creación obras sonoras transmediales.

En el año 2014 tuvo lugar el proyecto de investigación en arte electrónico y bioarte Híbrida, en donde el autor y la artista Paloma Oliveira tenían como meta reflexionar acerca de las diversas maneras en las que la tecnología puede ampliar o distorsionar la percepción humana. Para este cometido se analizaron a profundidad las tecnologías de sensores biométricos y biosensores, así como sus diferencias, por medio de dos laboratorios de creación, talleres y conferencias. Fue durante estas que conocí el concepto de *chip*¹ genético a través del artículo científico titulado *A synchronized quorum of Genetic Clocks* de Tal Danino, Octavio Mondragón Palomino, Lev Tsimring y Jeff Hasty, durante la conferencia dictada por el Dr. Pablo Padilla Longoria sobre biología sintética y biosensores. A partir de ese momento comenzó mi acercamiento a los cómputos de sustrato biológico.

Por otro lado, del 2012 al 2016 formé parte del proyecto de investigación *Palas y las Musas, Diálogos entre la Ciencia y el Arte*, una iniciativa conjunta entre el Instituto

¹ En computación suele llamársele *chips* a los circuitos integrados sobre los cuales se fabrican las computadoras. Se utilizará esta nomenclatura en este texto debido a su repetida aparición en la bibliografía referente a cómputos no convencionales.

de Investigaciones Estéticas y el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la UNAM. Se realizó una colección de 6 libros en donde se abordan las relaciones entre las ciencias y las artes desde el periodo renacentista hasta nuestros días. Mi contribución en este trabajo fue la de coordinar el volumen del periodo contemporáneo y escribir un capítulo titulado *Arte Generativo, Antecedentes y Perspectivas*, en esta investigación se desarrolla la pregunta ¿puede existir el arte generativo sin el uso de computadoras? Es decir ¿los algoritmos son exclusivamente tema de las computadoras digitales? Y si la respuesta es negativa ¿cuál sería la naturaleza del arte generativo producido con computadoras y sin computadoras? Y, por último, una pregunta que ya no fue desarrollada en este capítulo, pero que le da seguimiento a esta investigación y una base conceptual al proyecto de computadoras de sustrato biológico es ¿Cuál es la naturaleza de las computadoras? ¿Todas las computadoras son electrónicas y automatizadas? Es con esta pregunta que me adentro de lleno en la búsqueda de otros tipos de cómputo.

Para el año 2017 comencé a trabajar en la serie de obras a la que pertenecen las referentes a esta tesis. El proyecto fue nombrado *La rebelión de las formas* y consiste en el desarrollo de esculturas, instalaciones y actos en vivo utilizando diferentes paradigmas de cómputos de sustrato biológico. La inspiración para este proyecto vino del análisis de la computadora hidráulica MONIAC (*Monetary National Income Analog Computer*) (Fig. 1) creada en 1949 por el economista neozelandés William Phillips. Esta computadora fue diseñada como una herramienta pedagógica que ayudaría a los estudiantes a comprender las relaciones complejas entre diversas variables macroeconómicas de una manera rápida y visual, en un momento de la historia en la que las computadoras no tenían periféricos como pantallas y monitores (Ongan, 2008). Esta máquina inclusive puede graficar en tiempo real.

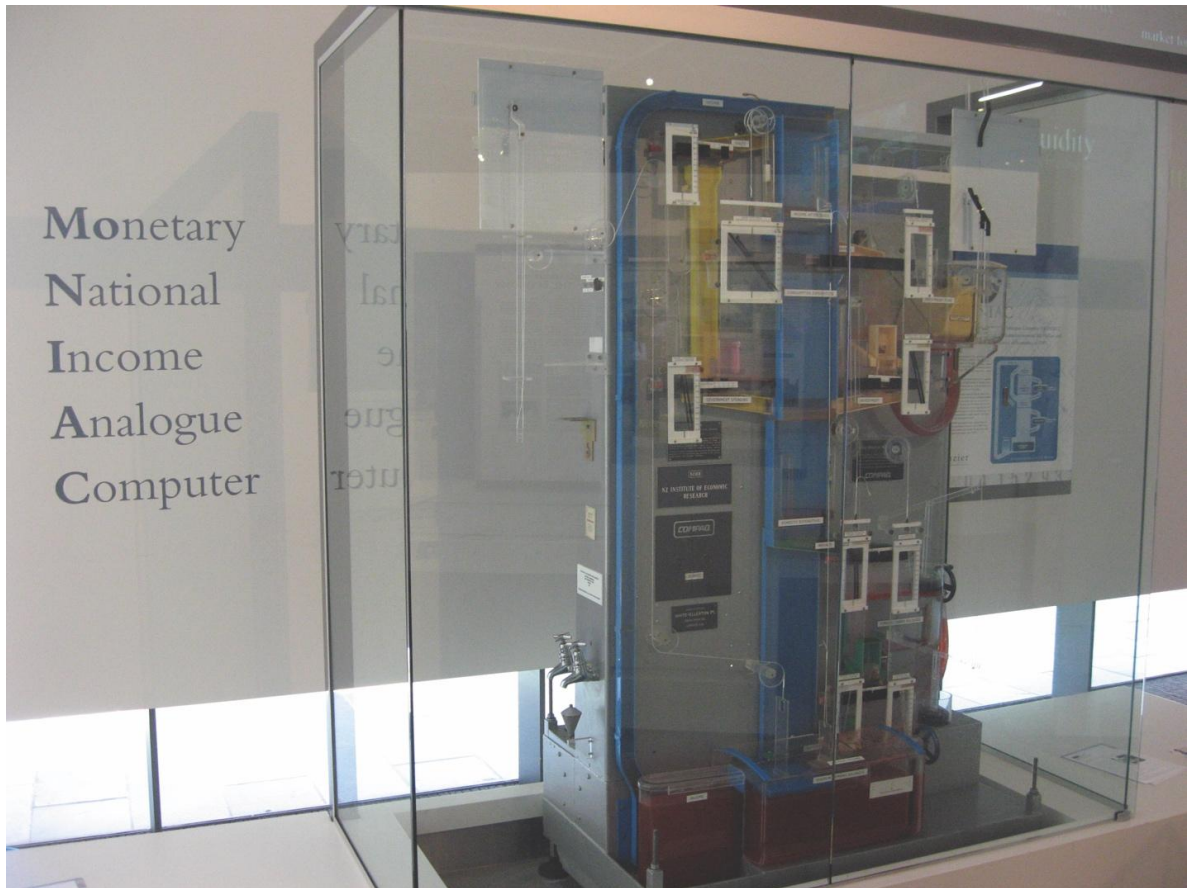


Fig. 1 Computadora MONIAC expuesta en el Banco de la Reserva de Nueva Zelanda ubicado en la ciudad de Wellington.

El objeto en sí mismo tiene cualidades esculturales interesantes y su forma está dada por el tipo de problema que se quiere resolver, así como la interdependencia de sus variables: tipos de cambio, tipos de interés, ahorros, inversiones, gastos gubernamentales, impuestos, importaciones y exportaciones. Pero ¿qué pasaría con esta arquitectura si cambiáramos el problema a resolver? Digamos, la distribución de agua potable en un territorio determinado, o la optimización arquitectónica de un sistema de transporte colectivo como el metro. La forma de nuestra computadora cambiaría drásticamente. Esta relación entre la forma que toman nuestras herramientas en función de la forma que tienen los problemas a resolver es el concepto central de este proyecto, dado que es muy evidente y estético en el mundo de los cómputos no convencionales. La idea es crear esculturas, instalaciones y acciones sonoras inspiradas en las formas que genera la cognición humana cuando se enfrenta a fenómenos naturales y sociales.

La primera obra desarrollada, gracias al Programa de Apoyo a la Producción e Investigación en Arte y Medios (PAPIAM) del Centro Multimedia del Centro Nacional de las Artes, fue una implementación de los *chips* químicos propuestos por Danino y sus colaboradores, en donde se inserta un oscilador genético en una bacteria, *Escherichia Coli*, lo que le permite brillar intermitentemente y visualizar por medio de esa bioluminiscencia los procesos de *quorum sensing*, es decir, la comunicación bacteriana de una colonia específica (Danino, T. et al 2010), titulada *Pulcher Aureus Filum* (del latín: Un Hermoso Hilo Dorado). Y después, el proyecto en que ahondaremos en los siguientes capítulos, apoyado por el Fondo Nacional para la Cultura y las Artes (FONCA) a través de su programa Jóvenes Creadores. Ahora, se siguen desarrollando investigaciones en otros paradigmas de cómputo aplicado a la creación artística desde Independencia Biolab, un laboratorio de *biohacking* y bioarte fundado por el autor en colaboración con diversos laboratorios e institutos de la UNAM como el Laboratorio de Biología Molecular y Genómica, el Laboratorio de Biofísica, ambos de la Facultad de Ciencias, el Instituto de Fisiología Celular y el Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, en su proyecto de investigación Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-IN406620) titulado *Artefactos y Automatas. Modelos Matemáticos, Arte y Filosofía*.

Justificación

En el contexto actual de generación de conocimiento, las investigaciones, tanto artísticas como científicas, se han vuelto cada vez más transdisciplinarias, debido a la complejidad de temas que se están abordando y al agotamiento de la hiperespecialización de la perspectiva positivista. Si bien es necesario tener una formación sólida en un campo en específico para abordar una investigación inter y transdisciplinaria, también se ha generado una sensibilidad para formular preguntas que no se agotan dentro de una disciplina específica de conocimiento. Por otro lado, desde hace algunos años los cruces entre las artes y las ciencias han sido tema

central de investigaciones, curadurías y exposiciones, debido a la potencia que han demostrado las artes para generar conocimiento formal y abstracto. Por lo que la pertinencia de una investigación como ésta se hace evidente al juntar tantas áreas de conocimiento y producir obra artística, preguntas científicas y nuevas tecnologías.

Objetivos del trabajo

Los objetivos centrales de esta tesis son:

- 1.- Proponer nuevas formas musicales, así como nuevas formas de presentar composiciones al público inspiradas y producidas por computadoras de sustrato biológico.
- 2.- Documentar los procesos de composición y de creación de tecnología ligados al uso de cómputos de sustrato biológico.
- 3.- Proponer estrategias de sonificación de fenómenos autoorganizados y aplicaciones creativas para la composición.
- 4.- Describir el modelo de ruido BZL y documentar los códigos computacionales.
- 5.- Explicar los mecanismos de los cómputos no convencionales desde la perspectiva de las ciencias de la computación sus alcances y limitaciones.

Hipótesis

Las compuertas lógicas activadas con osciladores químicos pueden ser consideradas como tecnologías de cómputo y su asistencia para fines artísticos puede ampliar conceptos compositivos y generar herramientas de creación multimedia expandidas.

Alcances y limitaciones

Este trabajo de investigación se inscribe en el contexto de la licenciatura en composición de la Facultad de Música de la Universidad Nacional Autónoma de

México, por lo tanto, los alcances de este trabajo quedarán limitados a las propuestas de implementación en el ámbito de la composición musical, sin embargo, se intentará también documentar de la mejor manera todos los mecanismos que permiten hacer computadoras químicas y abrir preguntas que pueden ser retomadas después en el contexto de las ciencias de la computación.

Aportaciones

Uno de los pioneros en la implementación de cómputos no convencionales en la composición es el brasileño Eduardo Reck Miranda con sus experimentos de *Physarum Polycephalum* como parte del grupo de investigación de cómputos no convencionales de la Universidad de Plymouth en Inglaterra. A partir de ahí se han replicado y diversificado esos experimentos en diversas partes del mundo. Hasta este punto solo se ha encontrado un solo artículo que sugiere la aplicación de este oscilador químico para la composición titulado *Musical morphologies from self-organizing systems* del artista Peter Beyls publicado en 1990 por la *Interface Journal of New Music Research*, así que la publicación del texto mismo es ya una aportación a la literatura de música computacional debido a que en este trabajo se muestran aplicaciones puntuales de este paradigma de cómputo y no solo sugerencias de uso como en el artículo citado.

En segundo lugar, toda la bibliografía sobre cómputos no convencionales está en inglés y algunos artículos en francés y alemán, no se encontró en la revisión bibliográfica ningún texto en español, por lo que puede servir este texto como una introducción a los conceptos más importantes del cómputo no convencional para los lectores de habla hispana.

En cuanto a las aplicaciones de los chips químicos se pueden contar tres aportaciones: la primera, una implementación de una red neuronal en este paradigma de cómputo. La segunda, un modelo de ruido que surge de la sonificación del oscilador que fue nombrada modelo de ruido BZL (Belousov-

Zhabotinsky-Lobato). La tercera, un secuenciador no lineal y su descripción formal en comparación a secuenciadores lineales y aleatorios, un bosquejo hacia una teoría general de los secuenciadores.

Y, por último, la aportación más importante, un modelo de interacción compositor-público que reduce los pasos de comunicación entre el emisor y su receptor, donde el público se convierte en intérprete, y compositor a la vez, los intérpretes llegan disfrazados de público e interpretan y componen la obra, y el compositor se vuelve parte del público e intérprete. La composición se desdibuja y se convierte en un mecanismo de activación de un evento de comunidad, un precursor, un modelo inspirado en los sistemas excitables y aplicado en la parte sonora de la obra *Pulcher Aureus Filum* de la cual se hablará más adelante.

Fundamentos teóricos

El tema de esta tesis es de un profundo carácter transdisciplinario, aborda temas de electrónica, ciencias de la computación, biología molecular, química no lineal, instalación, escultura, arte sonoro y por su puesto composición asistida por computadora. Dada la complejidad del tema a tratar se recomiendan los siguientes textos de consulta como complemento a las referencias bibliográficas que aparecerán durante la tesis.

- Miranda, E. (2001). *Composing music with computers*. Oxford Boston: Focal Press.
- Rojas, R. y Hashagen, U. (2000). *The first computers: history and architectures*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Cormen, T. (2001). *Introduction to algorithms*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Bishop, M. (2001). *An Introduction to Chemistry*. San Francisco: Benjamin Cummings, Pearson.
- Krebs, J., Lewin, B., Kilpatrick, S. y Goldstein, E. (2014). *Lewin's genes XI*. Burlington, Mass: Jones & Bartlett Learning.
- Murray, J. (2002). *Mathematical biology*. New York: Springer.

1. Fundamentos computacionales

1.1 Cómputos no convencionales

En las últimas décadas se han venido desarrollado un grupo de teorías y acercamientos metodológicos conocidos como las ciencias de la complejidad fuertemente apoyados por la teoría de sistemas y la computación. El estudio de cómo y por qué los fenómenos de la realidad oscilan entre el caos y la regularidad, se ha encargado de trabajar sobre tres grandes ejes (los cuales están íntimamente ligados al tema de esta tesis): la teoría matemática de la computabilidad –más propiamente conocida como el conjunto de los problemas P-NP–, las relaciones entre el universo microscópico y el universo macroscópico, y la teoría de los sistemas dinámicos (Maldonado y Gómez, 2010).

En particular el problema P-NP se pregunta informalmente cuáles pueden ser verificados rápidamente por una máquina de Turing. Y al no haber avances significativos para finales del siglo XX varios científicos comenzaron a buscar diferentes maneras de resolver ese problema al observar el inminente decaimiento de la ley de Moore², por más computadoras que se tuvieran no se estaba alcanzando la meta de cómputo, ¿sería posible diseñar nuevos modelos de computación capaces de sobrepasar la barrera de las máquinas de Turing? (Claude, 2016)

Es en 1994 que Christian S. Claude y John Casti acuñan el término de cómputos no convencionales para agrupar a todos los intentos de gestionar y procesar de manera alternativa la información. Es así que en 1998 organizan la primera conferencia internacional sobre modelos de computación no convencionales organizada por el Centro de Matemáticas Discretas e Informática Teórica de Auckland en Nueva

² La ley de Moore es una famosa tendencia empírica que establece que el número de transistores en un circuito integrado denso se duplica aproximadamente cada dos años. Se propuso en 1965 por Gordon Moore, cofundador de Intel. (Moore, G.E. 1965)

Zelanda y el Instituto Santa Fe de Nuevo México. Para esa primera reunión los temas giraron mayoritariamente en torno a la computación bioinspirada, computación genética y computación cuántica.

En general la definición de cómputos no convencionales, como la proponen Claude y Casti, es todos aquellos cómputos que puedan abordar el problema de la tesis Church-Turing de maneras alternativas y sobrepasarla, es decir hipercómputos³. Esto no excluye a las computadoras que funcionan a través de electricidad,

“los temas típicos de este campo incluyen, entre otros, física de la computación (por ejemplo, lógica conservadora, termodinámica de la computación, computación reversible, computación cuántica, computación basada en colisiones con solitones, lógica óptica); computación química (por ejemplo, implementación de funciones lógicas en sistemas químicos, procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones en sistemas químicos de reacción-difusión y redes de reactores químicos); computación biomolecular (por ejemplo, basada en conformación, procesamiento de información en matrices moleculares, memoria molecular); autómatas celulares como modelos de complejidad informática masivamente paralela (por ejemplo, complejidad computacional de arquitecturas de computadora no estándar; teoría de la computación amorfa; química artificial); lógicas no clásicas (por ejemplo, sistemas lógicos derivados del comportamiento espacio-temporal de sistemas naturales, razonamiento lógico en sistemas físicos, químicos y biológicos); actuadores inteligentes (por ejemplo, máquinas moleculares que incorporan procesamiento de información, conjuntos inteligentes de actuadores); sistemas de hardware novedosos (por ejemplo, VLSI de autómatas celulares, chips neuronales funcionales); computación mecánica (por ejemplo, cifrado micromecánico, computación en nanomáquinas, límites físicos a la computación mecánica)” (Adamatzky et al., 2017).

³ Por hipercómputos no nos referimos a las ya tan famosas supercomputadoras, sino a máquinas superturing, es decir máquinas que pueden computar funciones incomputables en una máquina de Turing clásica.

Pero en este trabajo nos enfocaremos a paradigmas de cómputo no convencionales que no necesitan electricidad para funcionar, sino agentes vivos, es decir computadoras de sustrato biológico.

1.2 Cómputos de sustrato biológico

Al hablar de cómputos de sustrato biológico surgen muchas dudas y confusiones acerca de la pertinencia del término. En particular con el término bioinformática, que “es un campo de las ciencias computacionales que lleva a cabo el análisis de secuencias de moléculas biológicas. Normalmente se aplica a los genes, al ADN, al ARN, o a las proteínas, y resulta especialmente útil para comparar secuencias de genes y proteínas entre distintos organismos, pudiendo ver las relaciones evolutivas entre organismos, e intentando averiguar cuál es la función de dichos genes y proteínas. Podríamos decir que la bioinformática se encarga de la parte lingüística de la genética. De la misma manera que los lingüistas estudian los patrones en el lenguaje, los bioinformáticos estudian los patrones en las secuencias de ADN o de proteínas” (Austin, 2020).

Es decir, se utilizan computadoras electrónicas como las que utilizamos día a día⁴ y se desarrolla software, sobre todo estadístico como herramienta para estudiar fenómenos biológicos. A diferencia de estos, las computadoras biológicas no tienen chips de silicio, ni circuitos de materiales conductores por donde se canaliza una corriente eléctrica. Estas computadoras contienen, por ejemplo, mohos mucilaginosos, cultivos de bacterias, tejidos vivos, reacciones químicas (fluidos), etc. Pero ¿es posible llamar a estos artefactos computadoras? ¿Qué es lo que hace a una máquina poseer tal nombre?

En el imaginario colectivo está totalmente insertada la imagen de la computadora personal como la conocemos hoy en día, incluso en una búsqueda rápida del

⁴ Para ser más precisos las computadoras a las que estamos acostumbrados son computadoras automatizadas y electrónicas con la arquitectura Von Neuman o arquitectura Princeton, descritas por John Von Neuman en 1945 en su *First Draft of a Report on the EDVAC*. (Neuman 1945).

término computadora en internet, la mayoría de imágenes y referencias son a ese tipo, y a veces a las supercomputadoras, que básicamente son clusters enormes de procesadores de la misma naturaleza. Del mismo modo encontraremos referencias a este paradigma de cómputo en textos de festivales de arte y nuevos medios, artículos de historia del arte computacional y digital, el arte generativo, el arte digital, el live coding, el arte post-internet. Pero si miramos en la historia de la computación, este tipo de máquinas tiene poco tiempo de haber aparecido y haber llegado a las manos de los grandes públicos.

El nombre computadora proviene del latín *computare*, que significa calcular. A pesar de cambiar de forma y tecnología, las computadoras son calculadoras y no siempre han sido automatizadas y mucho menos electrónicas. Pensemos en los huesos de animales marcados por el ser humano en la prehistoria

“la primera pieza a la que se han venido refiriendo los historiadores de la matemática es un hueso de lobo de unos 35.000 años, encontrado en Dolni Vestonice (Moravia, República Checa), donde también se descubrió una cabeza de mujer esculpida en marfil. En el hueso, de unos 18 centímetros de largo, se encuentran 55 muescas. En la primera descripción presentada por Karl Absolom el 2 de octubre de 1937 en London Illustrated, las marcas se consideraban agrupadas de cinco en cinco y separadas por dos trazos intermedios más largos en dos series, una de 30 ($= 6 \times 5$) muescas, y otra de 25 ($= 5 \times 5$)” (González, Martín-Loeches y Silván, 2010).

Este artefacto cumple con todos los requisitos para ser una computadora, para empezar, el consenso en la comunidad de historiadores de las matemáticas es que esas marcas fueron deliberadas, por lo tanto, podemos aseverar que es un artefacto que sirvió para contar. Además, puede hacer las 4 actividades básicas de una computadora, recibir una entrada (cambiar su forma a través de un proceso mecánico de raspado), guardar información⁵ (el material ha guardado estas marcas

⁵ Uno de los temas más recurrentes en torno al impacto de las tecnologías digitales en el mundo actual es la “desmaterialización” del mundo físico. Se habla mucho de pasar documentos, productos y servicios a la “nube”, se habla de este lugar virtual como si no ocupara un lugar en el espacio, pero no mucho ha cambiado desde que marcábamos huesos y piedras de animales; aún seguimos marcando la materia para contabilizar nuestra experiencia, sólo que ahora lo hacemos de manera magnética en los discos duros. Esa

¡Por más de 35.000 años!), procesarla (al convertir un fenómeno u objeto en un registro simbólico) y arrojar un resultado (al ofrecer al observador una visualización de datos). Si bien a veces es más complicado hablar de un software en algunos tipos de cómputos, siempre va a estar presente, en algunos casos la separación de objetos conceptuales que hace la computadora moderna no sucede de la misma manera en otros tipos de cómputo. Otro gran ejemplo de una computadora no automatizada ni electrónica es el ábaco mesopotámico o el quipu inca. Si bien los fractales, la teoría del caos o de la complejidad no habrían podido ser formulados sin la potencia y rapidez de las computadoras electrónicas, eso no significa que su manera de recibir, gestionar y procesar la información siempre vaya a ser óptima para todos los problemas⁶. Pero ¿Qué son las computadoras de sustrato biológico y cómo funcionan? A continuación, describiremos dos casos. En primer lugar, abordaremos las máquinas de *Physarum Polycephalum* y después las máquinas de bacterias. Además de documentar la naturaleza de estas computadoras, se describen estas máquinas porque están íntimamente ligadas a las máquinas químicas y nos ayudará a argumentar la propuesta original de esta tesis. Ambas por los frentes de propagación de ondas que producen y por trabajar con sistemas de reacción-difusión. Por otro lado, las segundas son básicamente colectividades de osciladores acoplados de manera no lineal.

1.2.1 Máquinas de *Physarum Polycephalum* (PhyChips)

El *Physarum Polycephalum* es un moho mucilaginoso

“*Physarum Polycephalum* pertenece a la especie del orden Physarida, subclase Myxogastromycetidae, clase Mixomicetos, división Myxostelida. Plasmodio es una fase vegetativa de *P. Polycephalum*, es una sola célula con una miríada de núcleos diploides. Se comporta y se mueve como una ameba gigante. Por lo general, el

tan famosa nube se encuentra distribuida en miles de centros de servidores localizados en diferentes partes del mundo. Veremos si estos servidores sobrepasan la barrera de los 35.000 años que los hombres prehistóricos nos dejaron.

⁶ Como se mencionó con anterioridad, esa es una de las razones principales para desarrollar nuevos tipos de cómputo.

plasmodio forma una red de tubos protoplásmicos que conectan las masas de protoplasma en las fuentes de alimentos, lo que ha demostrado ser eficaz en términos de longitud y resistencia de la red. Un chip Physarum es un dispositivo informático y de detección biológica implementado en la etapa vegetativa del moho mucilaginoso acelular Physarum Polycephalum. El Physarum Chip está programado por configuraciones espacio-temporales de repeler y atraer gradientes. Hay varias clases de chips Physarum: procesadores morfológicos, dispositivos de detección, circuitos lógicos biomoleculares y microfluídicos basados en frecuencia, y dispositivos electrónicos.” (Schummann y Pancerz, 2016).

Algunos de los experimentos más famosos desarrollados con este paradigma de cómputo son:

Resolución de laberintos. En el año 2000 los investigadores Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada y Ágota Tóth, diseñan un experimento en el que una colonia de Physarum resuelve un laberinto. Lo describen de la siguiente manera: “Cambia de forma (el Physarum) a medida que se arrastra sobre un gel de agar simple y, si la comida se coloca en dos puntos diferentes, producirá pseudópodos que conectan las dos fuentes de alimentos. Aquí mostramos que este organismo simple tiene la capacidad de encontrar la solución de longitud mínima entre dos puntos en un laberinto.

Tomamos una punta de crecimiento de un tamaño apropiado de un plasmodio grande en un canal de cultivo de 25 x 35 cm y lo dividimos en trozos pequeños. Luego los colocamos en un laberinto creado cortando una película de plástico y colocándola sobre una superficie de agar. Los trozos de plasmodios se extendieron y fusionaron para formar un único organismo que llenó el laberinto (Fig. 2a), evitando la superficie seca de la película plástica. En los puntos de inicio y final del laberinto, colocamos bloques de agar de 0.5 x 1 x 2 cm que contienen nutrientes (0.1 mg g⁻¹ de copos de avena molida). Había cuatro posibles rutas (α_1 , α_2 , β_1 , β_2) entre los puntos de inicio y final (Fig. 2a).

El plasmodium pseudopodia que alcanzaba callejones sin salida en el laberinto se contrajo (Fig. 2b), dando como resultado la formación de un solo pseudopodio grueso que abarca la longitud mínima entre los bloques de agar que contienen nutrientes (Fig. 2c). La posición exacta y la longitud del pseudópodo fue diferente en cada experimento, pero siempre se seleccionó el camino a través de $\alpha 2$, que era aproximadamente un 22% más corto que el de $\alpha 1$ (Fig. 2d). Aproximadamente el mismo número de tubos formados a través de $\alpha 1$ y $\alpha 2$ que la diferencia (aproximadamente 2%) en sus longitudes de trayectoria se pierde en el meandro de la trayectoria del tubo y está dentro del error experimental.

La adición de alimentos conduce a un aumento local de la frecuencia de contracción del plasmodio, iniciando ondas que se propagan hacia regiones de menor frecuencia, de acuerdo con la teoría de la dinámica de fases. El tubo plasmodial se refuerza o se desintegra cuando se encuentra paralelo o perpendicular, respectivamente, a la dirección de la contracción periódica local; el tubo final, siguiendo la propagación de la onda, unirá los sitios de alimentos por el camino más corto.” (Nakagaki, Yamada y Tóth, 2000)

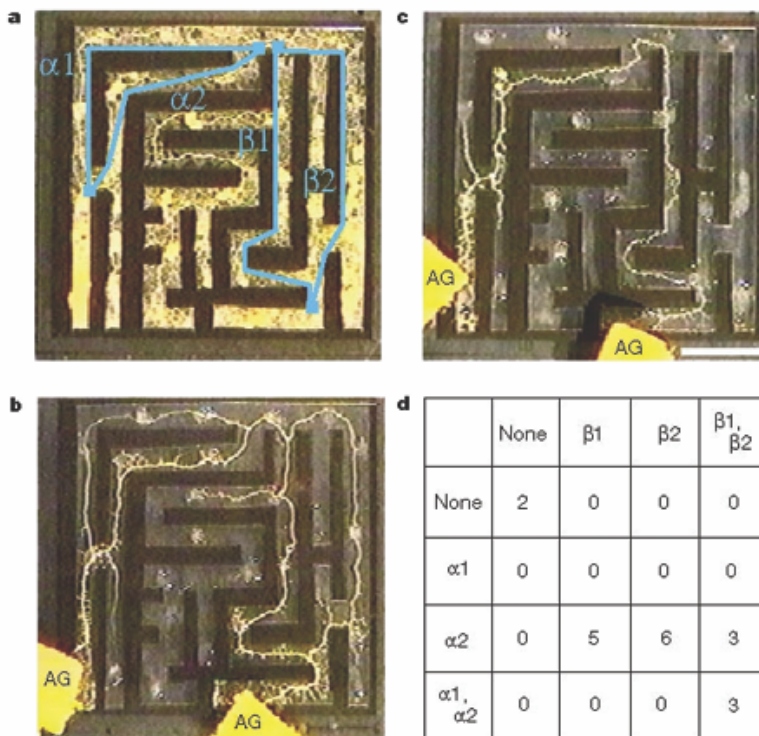


Fig. 2 imágenes del experimento en donde un cultivo de *Physarum Polycephalum* resuelve un laberinto.

El problema del vendedor viajero. Este problema es del tipo NP-complejo⁷, esto quiere decir que la complejidad de pasos en un algoritmo crece de manera no polinomial con el crecimiento de las variables.

El siguiente experimento demuestra que es posible computacionalmente escalar este problema y que su complejidad de cálculo crezca de manera exponencial y dé resultados robustos y repetibles. Los investigadores lo describen de la siguiente manera:

“Elegir un mejor movimiento de forma correcta y rápida es una habilidad fundamental de los organismos vivos que corresponde a la resolución de un problema computacionalmente exigente. Un plasmodio unicelular de *Physarum Polycephalum* busca una solución al problema del vendedor viajero (PVV) cambiando su forma para minimizar el riesgo de estar expuesto a estímulos de luz aversivos. En nuestros estudios anteriores, informamos los resultados de la solución TSP de ocho ciudades. En este estudio, mostramos que el tiempo que tarda el plasmodio en encontrar una solución de PVV de calidad razonablemente alta aumenta linealmente a medida que el tamaño del problema aumenta de cuatro a ocho. Curiosamente, la calidad de la solución no se degrada a pesar de la expansión explosiva del espacio de búsqueda. Al formular un modelo computacional, mostramos que la solución de tiempo lineal puede lograrse si la dinámica intrínseca pudiera asignar recursos intracelulares para hacer crecer las terminales de plasmodio con una tasa constante, incluso mientras responde a los estímulos.” (Zhu, Kim, Hara y Aono, 2018).

⁷ Estos son los problemas más complejos de la informática. No solo son difíciles de resolver, sino que también son difíciles de verificar. Estos algoritmos tienen una propiedad similar a los de NP-Complete, todos pueden reducirse a cualquier problema en NP. Por eso, están en NP-Hard y son al menos tan difíciles como cualquier otro problema en NP. Simplemente, un problema se clasifica como NP-Hard cuando un algoritmo para resolverlo se puede reducir para resolver cualquier problema NP. Por lo tanto, los problemas NP-Hard son al menos tan difíciles como el problema NP, pero podrían ser mucho más difíciles o más complejos (Pokharel, 2020).

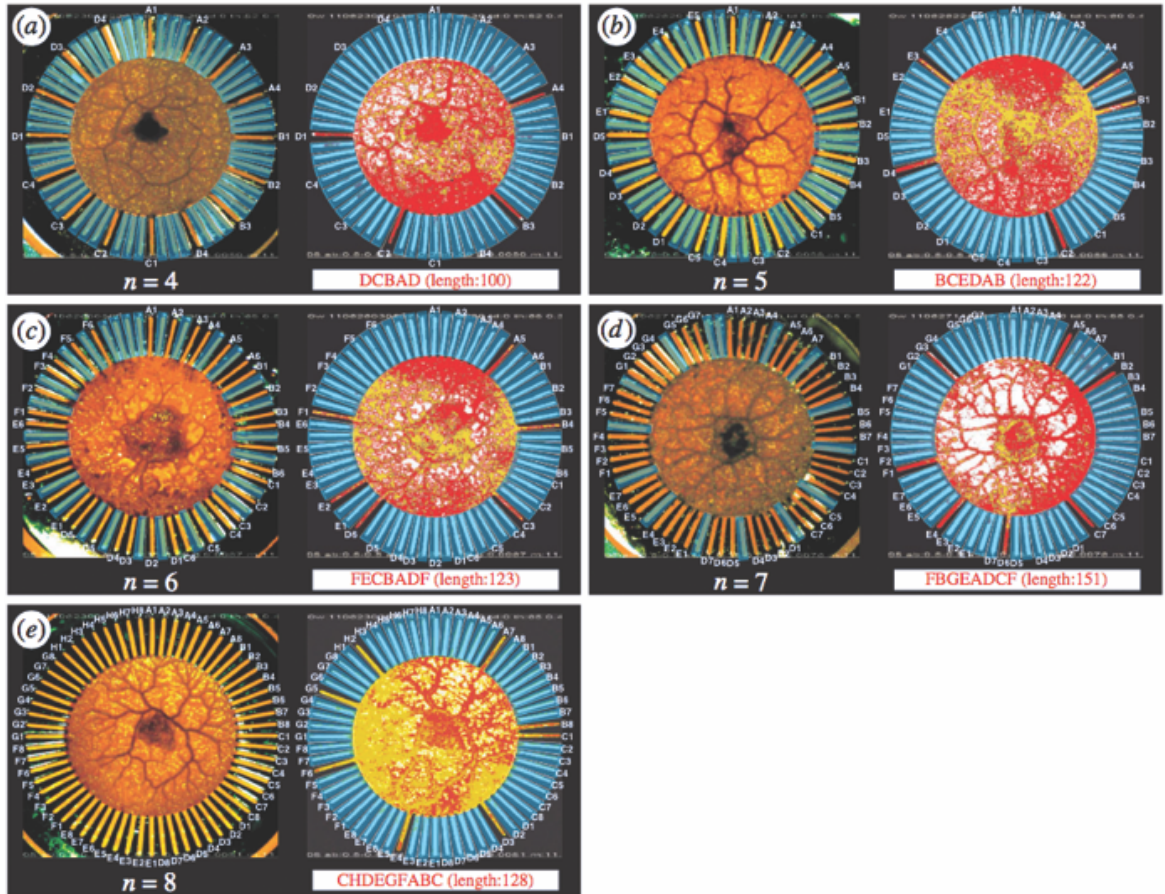


Fig. 3 Imágenes del experimento del vendedor viajero resuelto por una máquina de *Physarum Polycephalum* en donde se logró aumentar el tiempo de solución del problema de manera lineal conforme se aumentaba el número de sitios por visitar.

Síntesis Sonora. También existen varias aplicaciones de este paradigma de cómputo en el mundo de las artes. En este apartado describiremos un caso de estudio en donde se utilizan las capacidades eléctricas del *Physarum* para desarrollar un sintetizador híbrido con electrónica biológica y electrónica de corriente directa para construir lo que los autores llaman instrumentos musicales biónicos.

El *P. Polycephalum* produce actividad eléctrica, así que en este experimento se miden los cambios eléctricos en el tiempo de un grupo de cultivos interconectados para controlar un sintetizador granular aditivo, cada uno de los granos está compuesto por N componentes espectrales, o parciales y está asociado a un electrodo de medición. (Fig. 04)

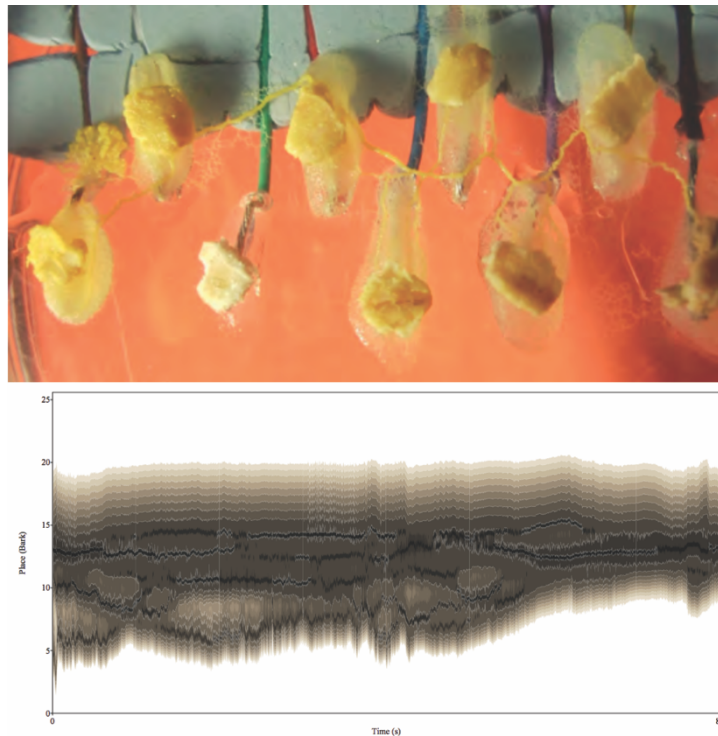


Fig. 4 nodos de *Physarum* conectados a la corriente eléctrica y las variaciones espectrales del registro de la señal compleja.

Ya una vez modelado este timbre, se articula compositivamente con un modelo simplificado de multiagentes como el que presenta Jones en su artículo “The Emergence and Dynamical Evolution of Complex Transport Networks from Simple Low-Level Behaviours”, los atractores son consumidos o removidos a discreción a manera de decisiones compositivas (Fig. 05). (Miranda, Adamatzky y Jones, 2011)

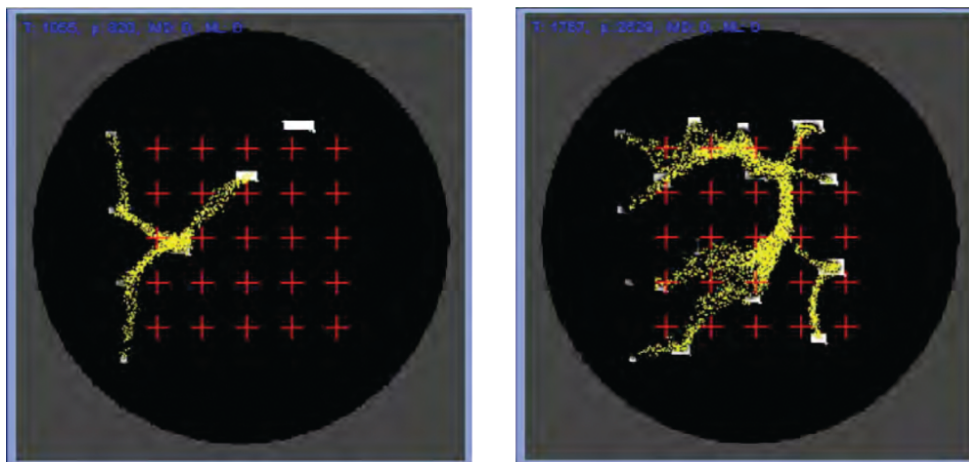


Fig. 5 secuenciador. En cada una de las cruces rojas se colocan, o no, atractores para que el *physarum* se mueva hacia ellos. Estos puntos también tienen sensores que pueden registrar el movimiento del *physarum* en su conjunto y esta información se utiliza para secuenciar los eventos de la composición.

Hacia un lenguaje de programación para las computadoras de sustrato biológico. Los chips de *P. Polycephalum* son uno de los paradigmas de la computación no convencional más estudiados y desarrollados entre la vasta gama de experimentos realizados hasta el momento. Hay experimentos sobre aproximación al camino más corto, gráficos de proximidad planares, diagramas de Voronoi, ejecución de operaciones lógicas básicas, lógica espacial, álgebra de procesos. (Miranda, 2011).

En este apartado abordaremos la propuesta de Andrew Schumann y Krzysztof Panerz de su libro *Physarum Machines. Selected Works* (Schumann, 2016) para sentar una base teórica que nos ayude a argumentar el acercamiento de programación propuesto por el autor en esta tesis. Es posible utilizar los chips químicos como herramienta para crear obras artísticas en el contexto de live coding.

Los autores describen la naturaleza de las puertas lógicas de *P. Polycephalum*, es decir, la naturaleza de sus computadoras:

“El moho mucilaginoso se considera un procesador difuso natural con valores difusos en el conjunto de enteros p -ádico⁸. El caso es que en cualquier experimento con el moho mucilaginoso tratamos con atrayentes que pueden colocarse de manera diferente para obtener diferentes topologías e inducir diferentes transiciones del moho mucilaginoso. Si el conjunto A de atrayentes, involucrado en el experimento, tiene el número de cardinalidad $p - 1$, entonces cualquier subconjunto de A puede considerarse como una condición para el experimento, como ‘Atrayentes ocupados por el plasmodio’. Estas condiciones cambian durante el tiempo, $t = 0, 1, 2, \dots$, y para el tiempo infinito, obtenemos enteros p -ádicos como valores de medidas difusas

⁸ Los números p -ádicos fueron introducidos en 1904 por el matemático alemán K Hensel. Se utilizan intensamente en teoría de números. El análisis p -ádico se desarrolló (principalmente para las necesidades de la teoría de números) en muchas direcciones. Cuando escribimos un número en decimal, sólo podemos tener un número finito de dígitos a la izquierda del decimal, pero podemos tener infinitos a la derecha del decimal. Es posible que "terminen" (y se conviertan en ceros después de algún punto), pero es posible que no. Se puede pensar que los enteros p -ádicos escriben enteros en base p , pero uno puede tener infinitos dígitos a la izquierda del decimal (y ninguno a la derecha; pero los números p -ádicos racionales pueden tener un número finito de dígitos en la derecha del decimal). (Rosikov, 2013)

(probabilidad) definidas en las condiciones (propiedades) del experimento. Este espacio es una semántica para la silogística difusa valorada p-ádica que construimos para describir la propagación del moho mucilaginoso. Además, proponemos una implementación de la parte finita de la aritmética p-ádica por medio de puertas lógicas con valores p-ádicos en el moho. Por lo tanto, cada experimento con *Physarum* puede entenderse como un controlador difuso con valor p-ádico en *Physarum* con cálculos sobre enteros p-ádicos.” (Schumann, 2016).

En su propuesta describen los sistemas de silogismos usados en su sistema de cómputo, éstos son muy importantes para los fines de esta tesis ya que, al igual que los chips químicos, se basan en frentes de propagación de ondas y su interacción con ciertas geometrías propuestas por los experimentos.

“Para hacer los cálculos sobre el árbol de *plasmodium* más expresivos, proponemos un sistema silogístico de propagación. Este sistema puede simular lógicamente un comportamiento masivo-paralelo en la propagación de cualquier enjambre (swarm). En particular, este sistema simula el comportamiento de colectivos de larvas de trematodos (miracidios y cercarias). Además, este sistema silogístico de propagación se puede utilizar como teoría lógica básica para la lógica cuántica (sin átomos lógicos). En esta teoría podemos construir árboles no bien fundados para los que no puede haber átomos lógicos. Esta teoría es mucho más expresiva que los algoritmos espaciales estándar para simular los movimientos del plasmodio. Definimos algunos algoritmos no convencionales en árboles no bien fundamentados para hacer más efectivos los cálculos sobre plasmodios. Estos algoritmos se implementan en plasmodios mediante puertas lógicas reversibles.

Construimos versiones silogísticas de la máquina de modificación de almacenamiento en *Physarum*. Implementamos dos silogísticas en el comportamiento biológico de *Physarum*: la silogística aristotélica y una silogística no aristotélica. Mientras que la silogística aristotélica puede describir direcciones concretas de expansiones espaciales de *Physarum*, la silogística no aristotélica puede describir propagaciones simultáneas de *Physarum* en todas las direcciones.” (Schumann, 2016).

A continuación, se describe el tipo de objetos matemáticos que se pueden usar con estos chips, en particular algebraicos.

“Para formalizar la computación Physarum, recurrimos primero a algunas extensiones probabilísticas y cronometradas del álgebra de procesos estándar para implementar modelos de comportamiento de conjuntos aproximados y cronometrados de las máquinas Physarum en nuestro nuevo lenguaje de programación orientado a objetos. En este lenguaje definimos redes bayesianas en conjuntos aproximados. Los cálculos basados en modelos de conjuntos aproximados nos permiten tener en cuenta algunas ambigüedades en los movimientos de Physarum. Proponemos utilizar modelos de conjuntos aproximados creados sobre sistemas de transición. En segundo lugar, definimos una extensión del álgebra de procesos, donde las acciones simples de los sistemas de transición etiquetados no pueden ser atómicas; en consecuencia, sus composiciones no pueden ser inductivas. Su significado informal es que en una simple acción podemos suponer el máximo de sus modificaciones. Tales acciones se llaman híbridas. Luego proponemos dos teorías formales sobre acciones híbridas (las acciones híbridas se definen allí como términos no fundamentados y fórmulas no fundamentadas): teoría de grupos y álgebra booleana.” (Schumann, 2016).

Una vez enunciados estos conceptos los autores describen su lenguaje de programación.

“Obtuvimos una base de un nuevo lenguaje de programación orientado a objetos para la informática Physarum. Dentro de este lenguaje podemos comprobar las posibilidades de implementaciones prácticas de máquinas de modificación de almacenamiento en plasmidios y sus aplicaciones a la ciencia del comportamiento, como la economía del comportamiento y la teoría de juegos. El lenguaje propuesto se puede utilizar para desarrollar programas para Physarum mediante la configuración espacial de nodos estacionarios. La distribución geométrica de los estímulos se puede identificar con un lenguaje de programación de bajo nivel para máquinas Physarum. Nuestro lenguaje de programación utiliza el enfoque basado en prototipos llamado también enfoque sin clases o basado en instancias. Hay conjuntos incorporados de prototipos correspondientes tanto a los modelos de alto nivel

utilizados para describir el comportamiento de Physarum (por ejemplo, diagramas de escalera, sistemas de transición, redes de Petri) como al modelo de bajo nivel (distribución de estímulos). De acuerdo con el enfoque basado en prototipos, los objetos que representan a los individuos se pueden crear sin referencia a la definición de clases mediante la palabra clave "nueva" utilizando constructores definidos. Los métodos se utilizan para manipular las características de los objetos y crear relaciones entre los objetos. Los objetos se pueden manipular en tiempo de ejecución." (Schumann, 2016).

1.2.2 Máquinas de Bacterias (chips genéticos)

Existen varios tipos de chips genéticos, pero en esta tesis presentaremos el trabajo desarrollado por Tal Danino y su equipo en el artículo que detonó la investigación sobre cómputos de sustrato biológico que da pie a esta tesis:

A Synchronized Quorum of Genetic Clocks (Danino, Mondragón, Tsimring y Hasty, 2010)

El experimento consiste en modificar genéticamente bacterias *Escherichia coli* para programarlas y hacer que produzcan ciertas moléculas de manera rítmica. En el caso de este trabajo, la molécula producida les sirve a las bacterias como medio de comunicación y esto permite generar frentes de propagación de ondas que interactúan con el espacio y hacen emerger ritmos espacio-temporales autoorganizados. Este paradigma de computación se basa en técnicas de biología

sintética⁹ e ingeniería genética¹⁰. Pero ¿A qué se refieren los investigadores cuando hablan de programar a las bacterias? Y ¿Cuál es el mecanismo por el cual las bacterias generan comportamientos autoorganizados?

El programa al que se refieren los investigadores es una construcción artificial de ADN conocida como plásmido. Un plásmido es

“una pequeña molécula de ADN circular que a menudo se encuentran en bacterias y otras células. Los plásmidos son separados del cromosoma bacteriano y se replican independientemente de ella. Por lo general, tienen sólo un número pequeño de genes, algunos de ellos asociados con resistencia a los antibióticos. Los plásmidos se pueden transmitir entre las distintas células bacterianas. Pequeños fragmentos de ADN, como ADN humano, se pueden unir a los elementos apropiados, circularizar, y luego introducirse en bacterias, donde pueden ser propagados - o, en otras palabras, se copian - junto con el cromosoma del huésped bacteriano.” (Green s/f).

Es decir, son pequeños pedazos de ADN artificial, seleccionado específicamente para que las bacterias realicen un trabajo en particular en un tiempo determinado. Por ejemplo, la inserción del operón lux nativo en la bacteria *Vibrio Fischeri* para hacer que brille una bacteria que naturalmente no lo haría.

⁹ “La biología sintética (SynBio) es una disciplina de reciente aparición que sirve para diseñar o rediseñar sistemas biológicos y otorgarles cualidades mejoradas o nuevas cualidades. En la SynBio el diseño de nuevos sistemas biológicos requiere de herramientas moleculares muy precisas, tales como: a) la bioinformática, b) la secuenciación NGS (Next Generation Sequencing), el ensamble y/o síntesis de ADN c) y la edición de genomas a través de CRISPR-Cas9. En la SynBio encontramos además otras disciplinas con un perfil más hacia el ámbito social, las cuales tocan aspectos éticos, legales, filosóficos y económicos, considerándose así una multidisciplina. La SynBio está propiciando el desarrollo de nuevas tecnologías (emergentes) partiendo de una óptica ingenieril. En la SynBio, al ADN se le entiende de forma práctica y abstracta como una serie de partes que se pueden ensamblar en cierto orden para obtener los productos deseados una vez que se conoce la funcionalidad de cada parte.” (Muñoz et al. 2019)

¹⁰ “La ingeniería genética es un término que se introdujo por primera vez en nuestro lenguaje en la década de los 70, para describir la naciente tecnología de recombinación del ADN y algunas de las cosas que estaban ocurriendo alrededor de la misma... la tecnología del ADN recombinante comenzó con cosas muy simples - la clonación de partículas muy pequeñas de ADN y su cultivo en bacterias - y ha evolucionado a un campo enorme donde genomas completos puede ser clonados y transferidos de una célula a otra, utilizando técnicas que se podrían definir de un modo muy amplio como ingeniería genética... la ingeniería genética, en sentido general, significa que se están tomando fragmentos de ADN y combinándolos con otras piezas de ADN. Esto realmente no sucede en la naturaleza; es algo que producimos en tubos de ensayo en el laboratorio. Y después se toma lo que hemos producido y se propaga en diferentes organismos que van desde células de bacterias, a las de levaduras, a las plantas y los animales.” (Bodine s/f)

En el caso de este circuito genético son dos los plásmidos introducidos a las bacterias, esto para poder crear un oscilador genético dentro de cada una de ellas, y controlar la sincronización de estos osciladores de toda la colonia, una red de biomoléculas interconectadas. Este oscilador es conocido como represilador, esto es un conjunto de 3 represores de proteínas que cambia de fase conforme interactúan.

En el artículo donde se describe por primera vez esta construcción genética se ejemplifica de la siguiente manera

“En la red que se muestra en la Fig.6, la primera proteína represora, *LacI* de *E. coli*, inhibe la transcripción del segundo gen represor, *tetR* del transposón *Tn10* resistente a tetraciclina, cuyo producto proteico a su vez inhibe la expresión de un tercer gen, *ci* del fago λ . Finalmente, *CI* inhibe la expresión de *lacI*, completando el ciclo. Tal ciclo de retroalimentación negativa puede conducir a oscilaciones temporales en las concentraciones de cada uno de sus componentes se puede ver a partir de un modelo simple de regulación transcripcional, que usamos para diseñar el represor y estudiar sus posibles comportamientos. En este modelo, la acción de la red depende de varios factores, incluida la dependencia de la tasa de transcripción de la concentración del represor, la tasa de traducción y las tasas de desintegración de la proteína y el ARN mensajero. Dependiendo de los valores de estos parámetros, son posibles al menos dos tipos de soluciones: el sistema puede converger hacia un estado estable, o el estado estable puede volverse inestable, dando lugar a oscilaciones sostenidas de ciclo límite.” (Elowitz y Leibler, 2000).

En otras palabras, los tres componentes están conectados de manera química, cada uno inhibe a un componente, pero es inhibido por el otro. Cuando se está generando uno de ellos, digamos *TetR*, *CI* baja su concentración porque *TetR* es su inhibidor, al bajar la concentración de *CI* comienza a subir la concentración de *LacI* porque *CI* es su inhibidor, y por último al subir la concentración de *LacI* comienza a bajar la concentración de *TetR*, de tal manera que en cada fase de la oscilación cada uno de los componentes tiene más presencia. En palabras menos técnicas aún, este

mecanismo funciona de la misma manera que el juego «piedra, papel o tijeras» piedra vence a tijeras, pero es vencido por papel; papel vence a piedra, pero es vencido por tijeras; tijeras vence a papel, pero es vencido por piedra.

Y por último se le añade un reportero al oscilador para poder visualizar su fase, la molécula de GFP, por lo que cuando haya más presencia de *TetR* la bacteria dejará de brillar, y cuando haya menos la bacteria brillará más.

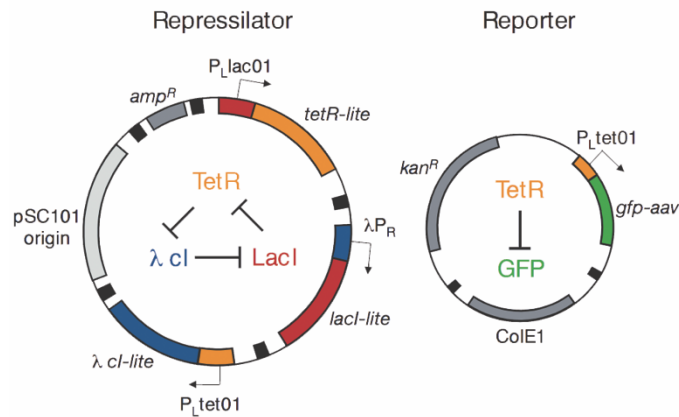


Fig. 6 Plásmido del represilator con el reportero GFP (oscilador genético).

Este represilator permite que las bacterias produzcan acil homoserina lactona¹¹ (AHL), que es la molécula a través de la cual pueden sincronizar los osciladores. Esta es la base de un mecanismo bacteriano conocido como percepción de quorum o autoinducción

“es la regulación de la expresión génica en respuesta a las fluctuaciones en la densidad de población celular. Las bacterias sensibles al quórum producen y liberan moléculas de señales químicas llamadas autoinductores que aumentan en concentración en función de la densidad celular. La detección de un umbral mínimo de concentración estimulante de un autoinductor conduce a una alteración en la expresión génica. Las bacterias grampositivas y gramnegativas utilizan circuitos de comunicación de detección de quórum para regular una amplia gama de actividades fisiológicas. Estos procesos incluyen simbiosis, virulencia, competencia, conjugación, producción de antibióticos, motilidad, esporulación y formación de biopelículas.” (Miller y Bassler, 2001).

¹¹ También existe otro tipo de comunicación vía péptidos entre las bacterias gram positivas.

Una vez modificadas las bacterias fueron puestas en un chip de microfluídica, de tal manera que pudieran mantener una colonia con suficiente alimento constante para estudiar el comportamiento de los osciladores acoplados por varias horas¹². En la figura 7 podemos ver el circuito, donde las zonas verdes son las cámaras donde se alojaron las bacterias.

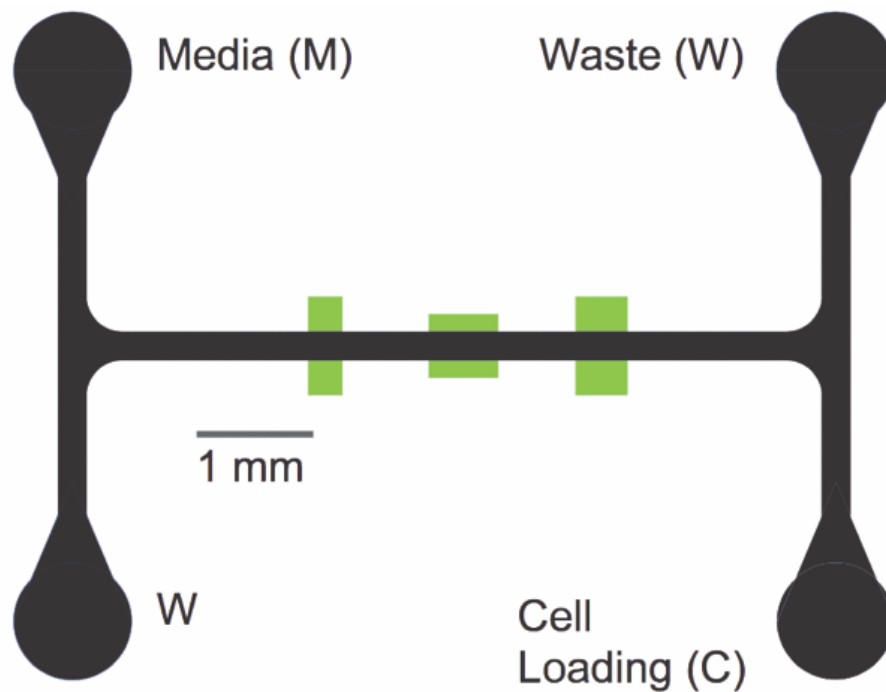


Fig. 7 Chip de microfluídica con trampas cuadradas para cultivar un biofilm de bacterias modificadas genéticamente.

La forma de cuadrado de las cámaras permitió que la AHL viajara de manera regular en toda la cámara, por lo que el frente de expansión de onda fue simétrico y parejo, causando así la sincronización de toda la colonia. Fig. 8

¹² El ciclo completo del represilador es más grande que el ciclo de reproducción de las bacterias, pero las siguientes generaciones heredan el momento de fase del oscilador.

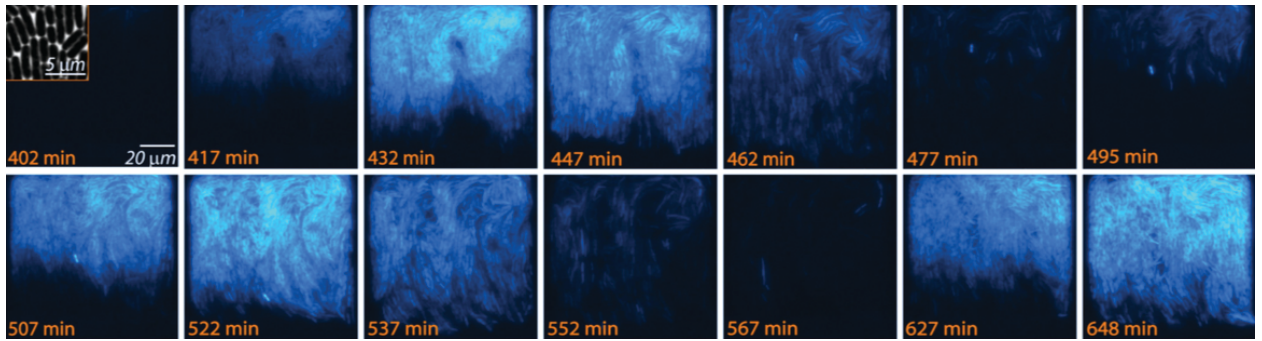


Fig. 8 stills del video de registro de las bacterias en las trampas cuadradas sincronizándose.

En un segundo experimento colocaron las bacterias en una cámara rectangular mucho más alargada Fig. 9.

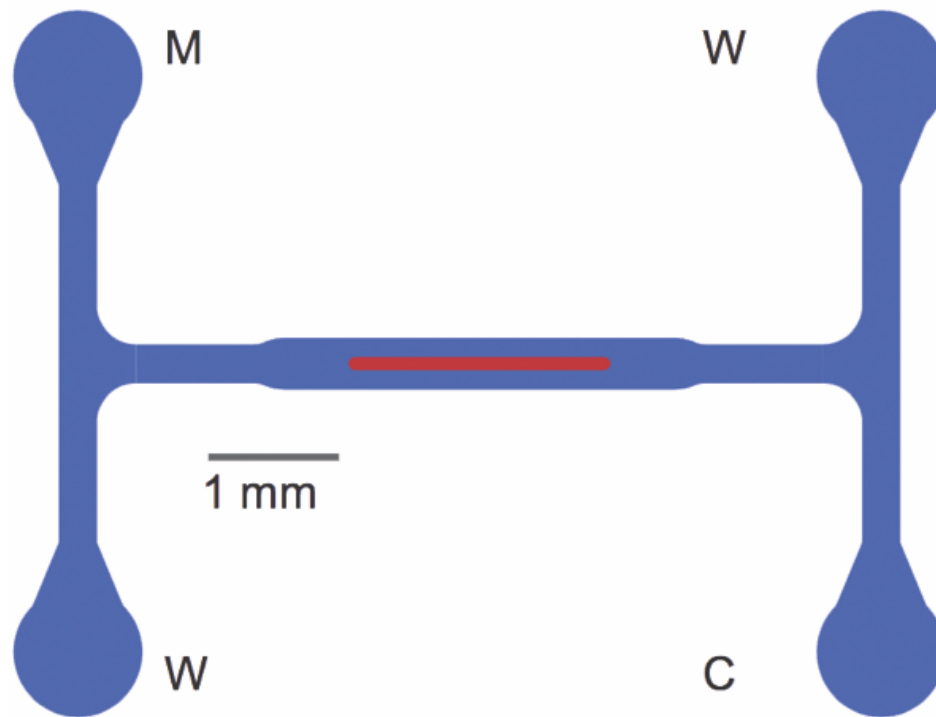


Fig. 9 Chip de microfluídica con una trampa rectangular alargada que permite ver otro tipo de patrón de sincronización diferente a las trampas cuadradas.

La nueva geometría de la cámara no permitió la misma difusión de la AHL, sino una distribución secuencial. Fig. 10.

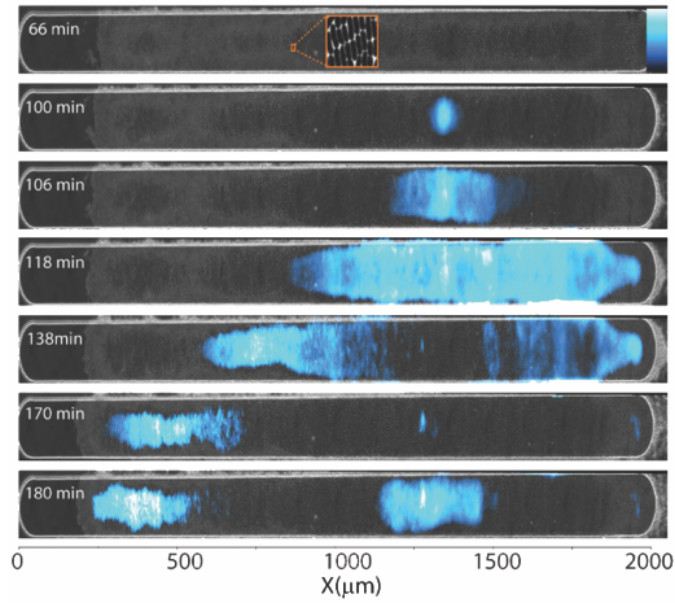


Fig. 10 stills del video de registro de las bacterias en las trampas rectangulares alargadas sincronizándose.

Por último, observaron el comportamiento de los osciladores sin un espacio que limitara la difusión de la AHL. Fig. 11.

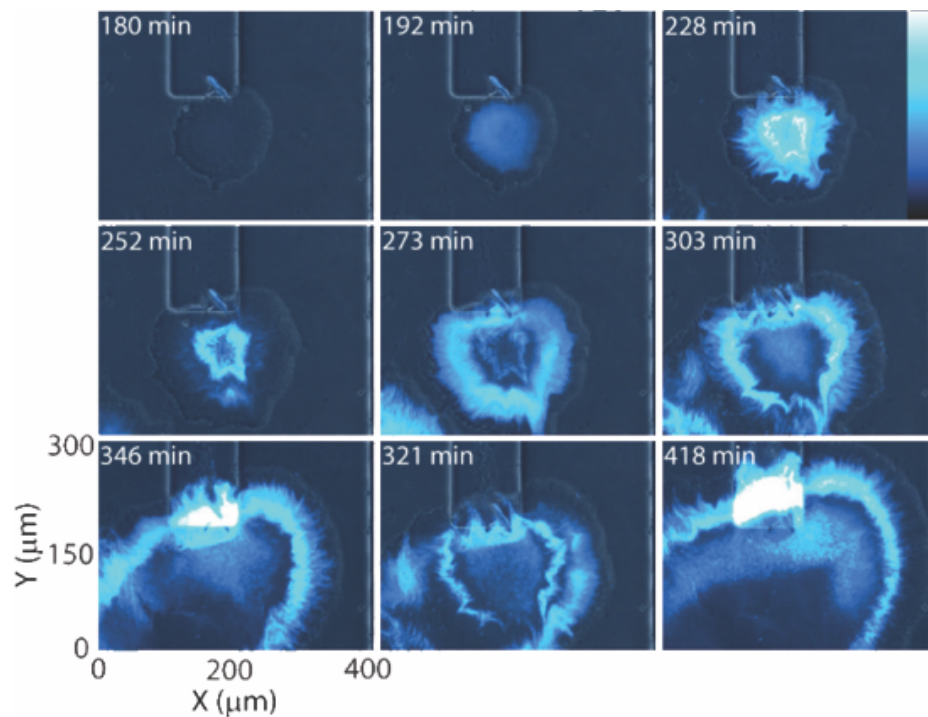


Fig. 11 registro del video llamado *Supernova*, un cultivo de bacterias modificadas sin restricciones espacial.

Con los experimentos realizados en esta investigación se evidenciaba la relación entre la forma del contenedor de las colonias de bacterias con la emergencia de ritmos espacio-temporales de las mismas, por lo que, encauzar ese frente de expansión de onda podría utilizarse como una puerta lógica para una posible computadora de bacterias, hecho que se explora en el desarrollo de la obra *Pulcher Aureus Filum* y sienta el precedente para el lenguaje de programación geométrico que se propone en esta tesis.

Esta es una de las aplicaciones de los chips genéticos al mundo del cómputo, pero hay varias maneras en las que los sistemas biológicos pueden convertirse en herramientas para el cálculo y procesamiento de información. Están los que implementan los artefactos de cómputo directamente en el ADN (Currin et al, 2017), los que emulan circuitos electrónicos con circuitos de proteínas-genéticos (Daniel, Rubens, Sarpeshkar & Lu, 2013) y los que usan las propiedades intracelulares de los seres vivos y la fisicalidad de los mismos (Danino, 2010) (Adamatzky, 2019).

Una aplicación de este sistema de cómputo fuera del mundo de la ciencia básica es la creación de un conjunto de sensores de "biopíxeles" genéticos acoplados radicalmente.

“La sincronización de los relojes genéticos proporciona una vía particularmente atractiva para las aplicaciones de la biología sintética. Las oscilaciones impregnan la ciencia y la tecnología en varias disciplinas, con ejemplos familiares que incluyen energía de corriente alterna (CA), el sistema de posicionamiento global (GPS) y láseres. Estas tecnologías han demostrado que operar en el dominio de la frecuencia puede ofrecer ventajas considerables sobre los diseños de estado estacionario en términos de recopilación y transmisión de información. En particular, los sensores oscilatorios confieren una serie de ventajas a los tradicionales, ya que la frecuencia se digitaliza fácilmente y se puede actualizar rápidamente con mediciones repetidas.” (Prindle et al, 2011).

Prindle y su equipo crearon una pantalla con las mismas bases que las de cristal líquido (LSD), pero con microfluídica y los píxeles son colonias de bacterias

acopladas. Este es un sistema al que se le agregó un reportero al plásmido para poder detectar arsénico, por lo que la presencia de este elemento influye en la sincronización de las colonias. Este es un sistema de cómputo paralelizado que le da más robustez al sistema, elimina el ruido y le permite escalarse para ser aplicado fuera del laboratorio. Fig. 12 y 13.

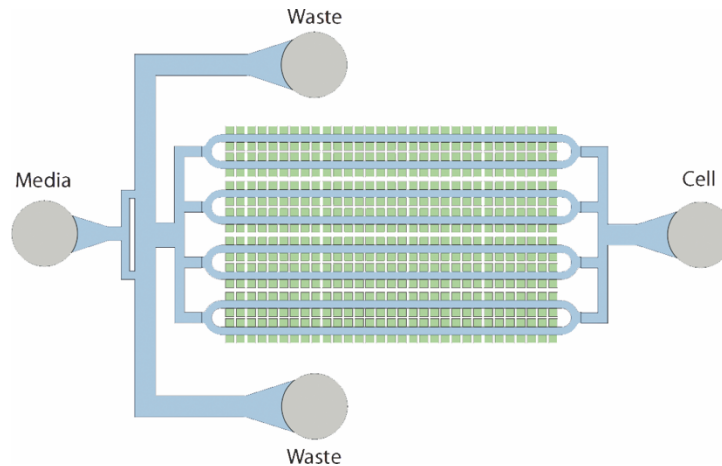


Fig. 12 Chip de microfluídica de la pantalla de píxeles de bacterias acopladas.

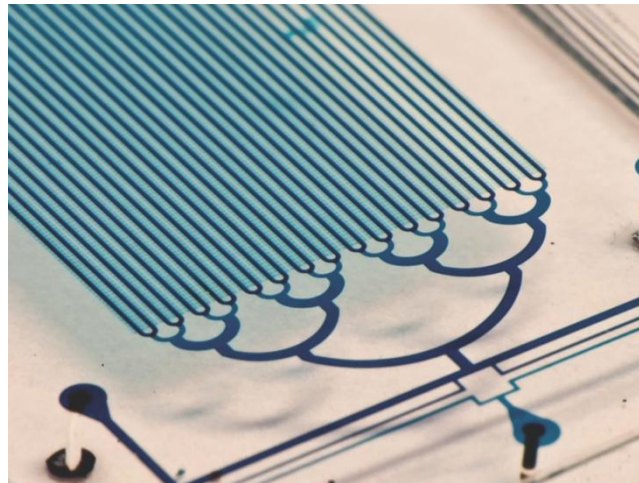


Fig. 13 Foto del chip de microfluídica de la pantalla de píxeles de bacterias acopladas.

Pulcher Aureus Filum

Pulcher Aureus Filum (del latín: Un Hermoso Hilo Dorado) es una obra de arte procesual. Inspirada en el trabajo de chips genéticos citado anteriormente, esta obra intenta producir todas las herramientas necesarias para crear una obra de arte

computacional y no solo una obra de arte audiovisual asistida por computadora. Las formas de una computadora como elemento base de la creación de una obra, la computadora como objeto estético y toda la humanidad que envuelve a este artefacto cultural, no sólo lo que se puede producir con ella. La creación de una obra espacial-sonora que represente las formas que genera la cognición humana al encontrarse con un problema en específico.

Pongamos un ejemplo dentro de un paradigma más conocido. Digamos que esta obra es un proceso dentro del cual se intentarán construir todas las herramientas y materiales necesarios para pintar un cuadro al óleo. Aprender carpintería para hacer el mango del pincel, el godet, el bastidor y el caballete; aprender las bases químicas para hacer aceite de linaza y pigmentos naturales; aprender textiles para elaborar un lienzo; realizar una pintura al óleo como síntesis de esa ecología de saberes.

En el caso específico de la obra en cuestión, el desarrollo tecnológico central era una computadora de bacterias, por lo que primero se desarrollaron las herramientas necesarias para poder insertar un plásmido en las bacterias que conformarían los chips genéticos. Se construyeron un openPCR¹³, una máquina de electroforesis¹⁴, un transiluminador¹⁵, incubadoras, se adquirieron algunas máquinas como un estereoscopio, micropipetas, así como cristalería. (Fig. 14).

¹³ Esta es una versión abierta de la máquina para hacer la reacción en cadena de la polimerasa, un proceso por el cual se amplifica el ADN y se generan copias de segmentos específicos. <https://openpcr.org/>

¹⁴ “La electroforesis es una técnica que emplean los científicos en el laboratorio utilizada para separar el ADN, el ARN, o moléculas o proteínas con base a su tamaño y carga eléctrica. Se utiliza una corriente eléctrica para mover las moléculas y que se separen a través de un gel. Los poros del gel actúan como un colador, permitiendo que las moléculas más pequeñas se muevan más rápido que las grandes. Las condiciones utilizadas durante la electroforesis se pueden ajustar para separar moléculas en el rango de tamaño que se desee.” (Austin, 2020) Este aparato permite visualizar el ADN de las bacterias modificadas.

¹⁵ Máquina que sirve para aumentar el brillo de las bacterias (así como proteínas, aminoácidos, péptidos, ácidos nucleicos, etc.) para ser registradas. Éste, a diferencia de los modelos más usuales, no es de luz ultravioleta, por lo que es más seguro y evita que las bacterias muten con una larga exposición.



Fig. 14 Detalle de la instalación Pulcher Aureus Filum, donde se muestran las herramientas de biología molecular que se desarrollaron para el proyecto.

Al mismo tiempo que se trabajaba en el instrumental se comenzó con el diseño de los chips con ayuda de técnicas de fabricación digital (modelado 3D, impresión 3D y router CNC). Se puso a prueba los límites de esas herramientas para poder diseñar y concretar los chips ¿qué materiales podrían funcionar y qué tanto se podría escalar el experimento?

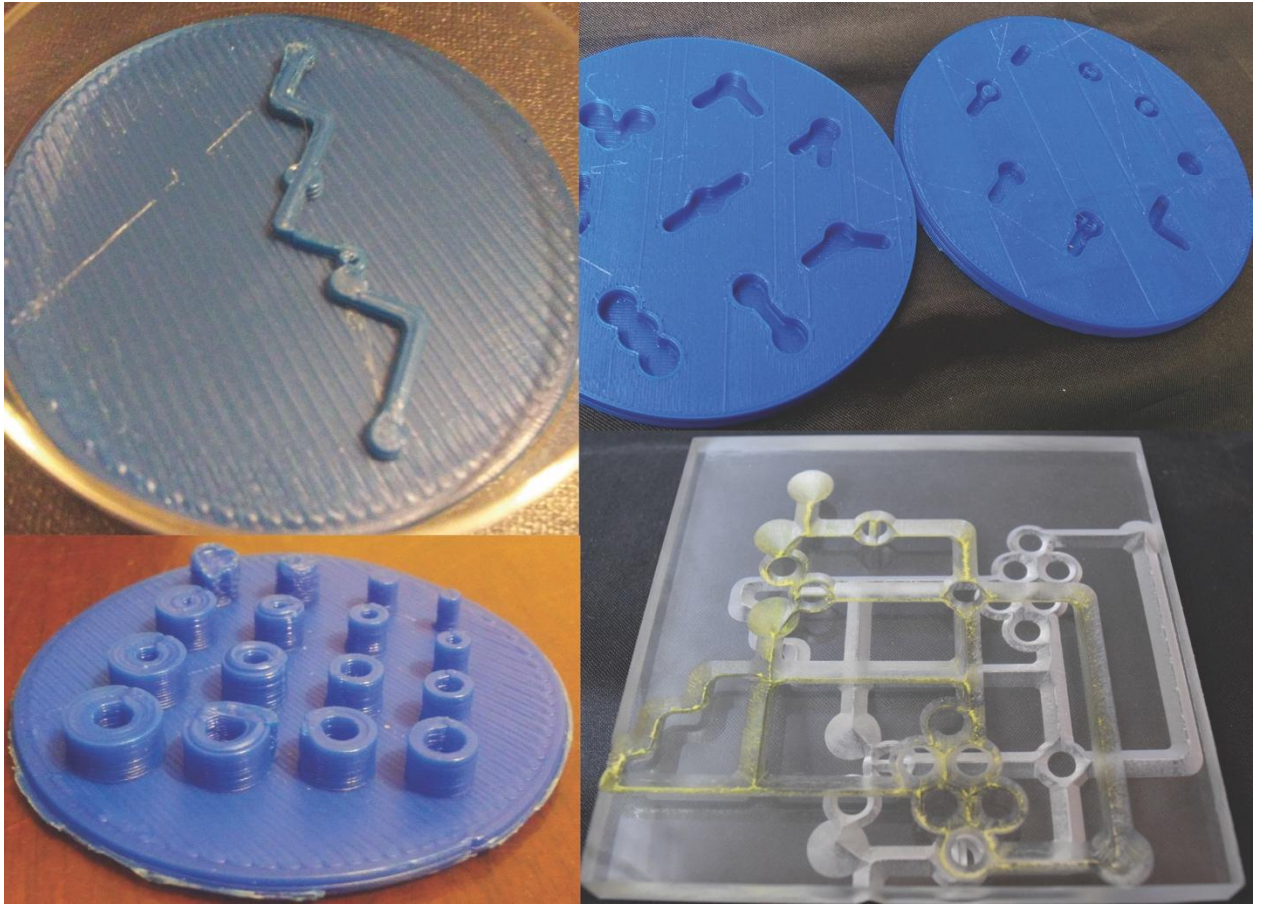


Fig. 15 Registro del prototipado de los chips genéticos. Con impresión 3D con filamento PLA (ácido poliláctico) y desbaste con máquina CNC sobre policarbonato sólido.

Una vez con la propuesta de lenguaje de programación y los primeros chips diseñados se comenzó a crear un medio de cultivo con protocolo *biohacker*¹⁶ y a sembrar las bacterias en ellos, las bacterias utilizadas fueron *Escherichia Coli* modificada genéticamente (Fig. 16-17) y *Vibrio Fischeri* (Fig. 18-19). Los comportamientos de estas bacterias fueron analizados a través de algoritmos de visión computarizada para recoger los datos de los ritmos espacio temporales que

¹⁶ Por protocolo biohacker nos referimos al siguiente proceso. Se busca un protocolo publicado y con la ayuda de laboratorios académicos consolidados (que en este caso fue el Laboratorio de Biología Molecular y Genómica de la Facultad de Ciencias de la UNAM) se implementa hasta que se prueba del todo, esto significa que se utilizan los reactivos ultrapuros adquiridos a farmacéuticas y laboratorios. Una vez probado el protocolo se comienzan a sustituir reactivos por productos que se pueden adquirir en un supermercado o tiendas diversas. En la mayoría de los casos se puede sustituir todo el protocolo completo y de esta manera se hace más barato y más accesible para comunidades específicas.

emergieron. Esta data fue analizada con algoritmos en Python después utilizada como base de datos para el control del *video mapping* de la pieza final.

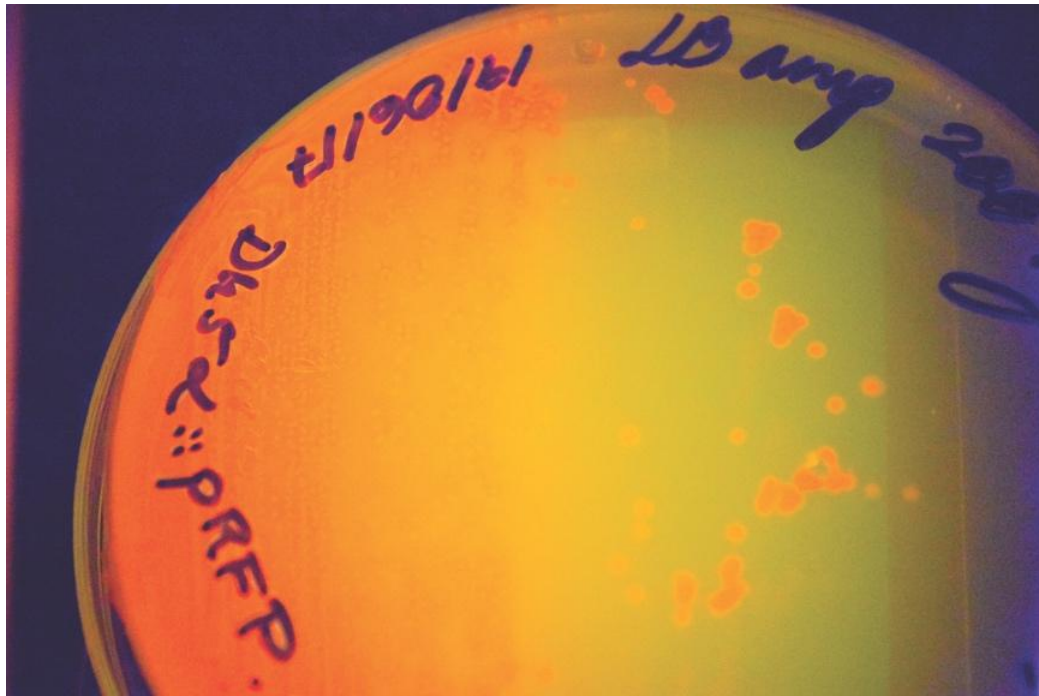


Fig. 16 Cultivo de bacterias fluorescentes.

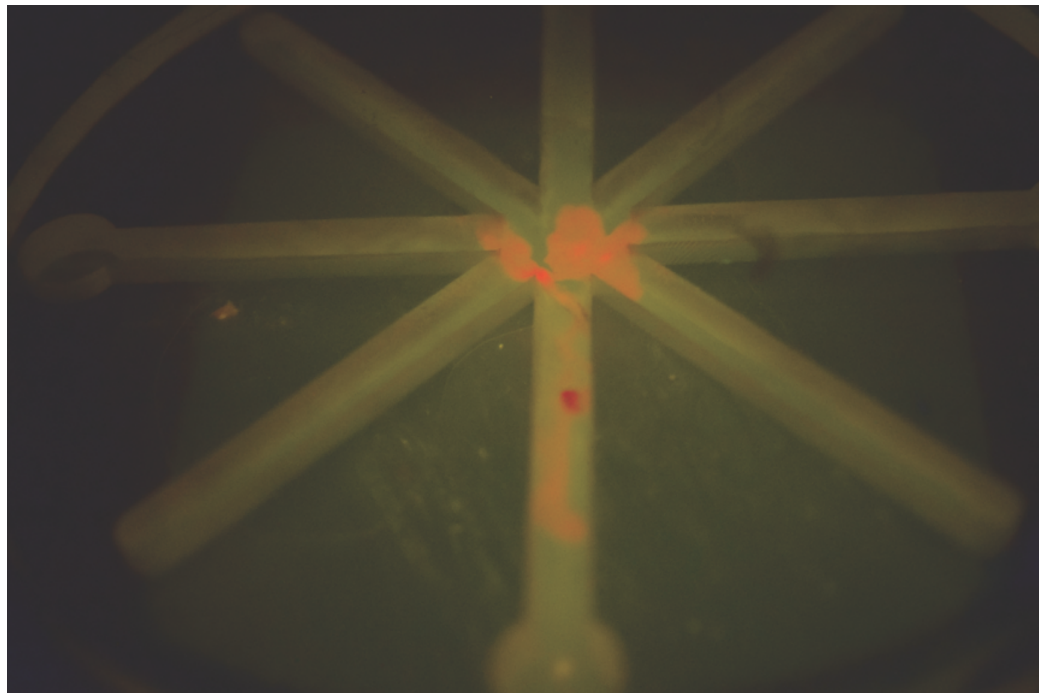


Fig. 17 Cultivo de bacterias modificadas en uno de los chips.

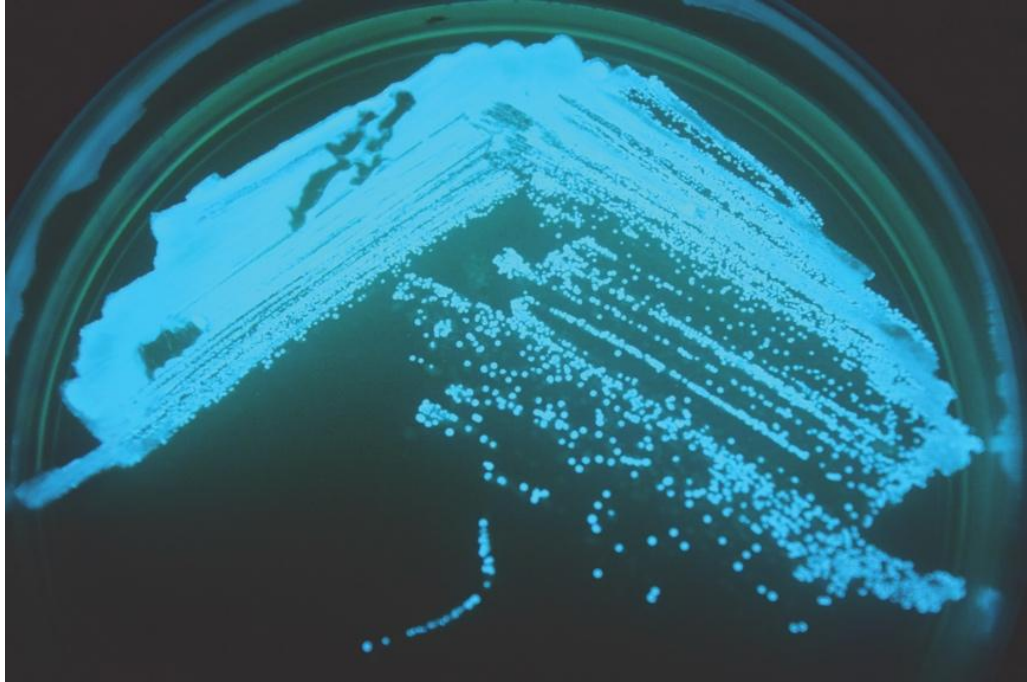


Fig. 18 Cultivo de bacterias aliivibrio fischeri aisladas para el proyecto.

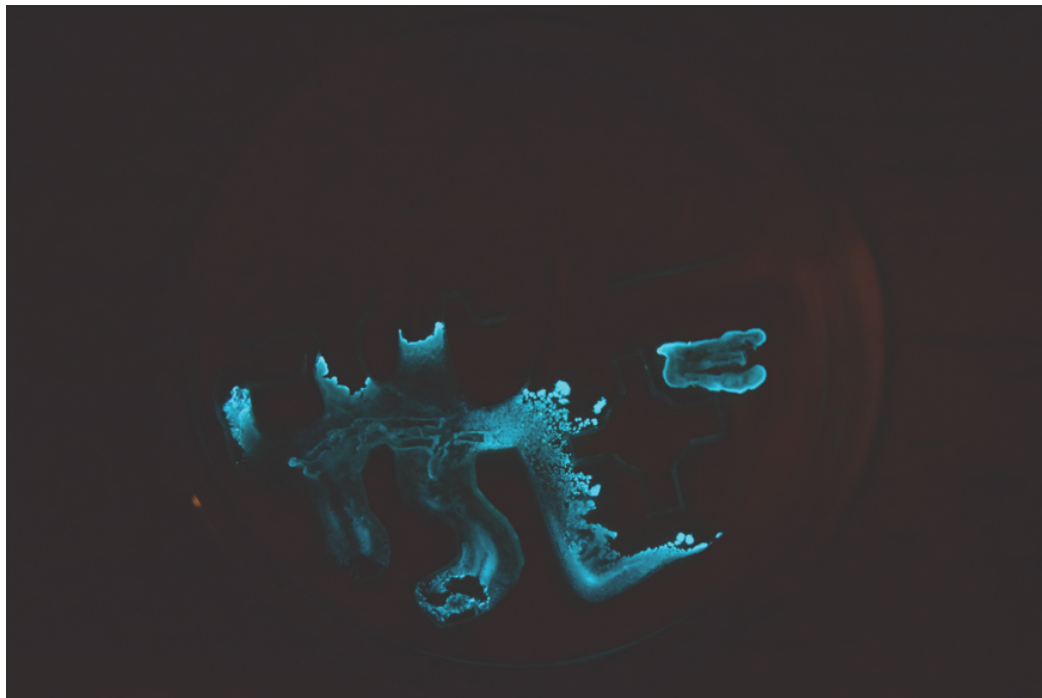


Fig. 19 Cultivo de bacterias aliivibrio fischeri en uno de los chips.

Para este momento del desarrollo de esta obra se habían puesto a prueba varias de las consideraciones de la publicación original en cuanto a las posibilidades y restricciones del trabajo con bacterias y su relación con la fisicalidad del medio de

cultivo, así como de los retos técnicos para escalar estos chips. Crear espacios artificiales para hacer habitar bacterias permite entender por qué en la naturaleza aparecen de una u otra forma y no de otras.

Otra de las consideraciones de este experimento fue directamente con las bacterias como seres vivos, no solo como partes de un artefacto biotecnológico que permite resolver operaciones booleanas, aritméticas o geométricas. El hecho de que las bacterias brillen significa que las estamos estresando a niveles límite y las colonias en algún momento comienzan a competir por el alimento. Todos los estudios sobre percepción de quorum permiten conceptualizar a las bacterias como entes colectivos, tal vez sociales, por lo que se hacía necesario generar un nivel de empatía y cariño por las bacterias. Frente a las obras de arte electrónico en donde se utilizan sensores e incluso sensores biométricos, esta obra plantea ser participativa cambiando el lugar de las herramientas por cómplices. Pero ¿Cómo lograr ese acercamiento post-antropocéntrico sin caer en la idea simplona y humanizada del dolor de otra especie? La respuesta se propuso a manera de acción sonora.

Escalar este fenómeno de sincronización a un nivel humano representaba un reto teórico y energético casi inalcanzable para un proyecto artístico. Pero si las bacterias podían darle su luz a esta obra, los humanos podían prestarle su voz. La parte sonora de esta obra fue una meditación activa. Esta meditación consiste en que los asistentes pueden cantar cualquier cosa, en cualquier volumen, con letras o sin ellas, con cualquier técnica que esté a su alcance. Como parte de la obra también se incluye a un coro que se presenta en la acción de manera incógnita, el público no sabe que habrá una parte de la obra en donde los cantantes profesionales cantarán con una partitura escrita por el autor. Las partes de la acción están divididas en tres:

- 1.- Introducción: todos comienzan a respirar profundamente y a escuchar atentamente su entorno para entrar en un estado de meditación. Todos están con los ojos cerrados.

- 2.- Preludio: Todos comienzan a emitir voz, de manera suave y a manera de calentamiento.
- 3.- Tema: Todos comienzan a cantar libremente subiendo la intensidad poco a poco.
- 4.- Autoinductor: El coro comienza a cantar la parte escrita para ellos.
- 5.- Cadenza: El autor hace un solo de voz con canto armónico y una *loop station*, espacializado en un sistema cuadrafónico.
- 6.- Coda: El coro regresa con la mecánica de meditación y todos comienzan un decrescendo hasta un silencio total.

Esta acción fue grabada con 8 canales independientes en lugares diferentes del espacio para después poder analizarlos y determinar las zonas y maneras en las que el público se sincronizó y desincronizó a nivel frecuencia (Fig. 20). El análisis hizo totalmente concluyente que la parte escrita determinista hizo que todo el conjunto de personas se sincronizase de una manera muy estrecha, y al terminar poco a poco fueron cambiando de notas y armonías, pero no se desincronizaron por completo. El mecanismo tradicional de la partitura (Fig. 21) en donde un compositor de una manera determinista organiza a un conjunto de personas sirvió como la acil homoserina lactona, al tener un porcentaje mínimo de personas con un acuerdo común, el resto se agregó al acuerdo y las notas de la partitura funcionaron como las geometrías aplicadas en los chips genéticos diseñados para esta pieza.

Al analizar los datos de los dos experimentos se hizo evidente que cada una de las escalas espaciales tiene sus propias características y leyes. Aún así, todas esas escalas conviven en el mismo espacio simultáneamente, es por eso que la física sigue buscando esa teoría del todo que permita abarcar nuestra realidad sin importar la escala espacial o temporal a la que nos refiramos. Pero, dentro de estos cambios de naturaleza en los espacios hay un elemento que transversalmente atraviesa indiferente estas limitantes, y ése es la información. Absuelta de fisicalidad, la información, así como la materia, no se crea ni se destruye y podríamos agregar que **tampoco se transforma** dependiendo de su entorno. Las

escalas son como las cuentas de un collar universal, y éstas, están unidas por un hermoso hilo informacional, un hermoso hilo dorado.



Fig. 20 Fotografías del performance sonoro que se llevo a cabo en el Centro Cultural Universitario de la UNAM parte del proyecto curatorial Meditatio Sonus de Marcela Armas y Arcángelo Constantini.

2

30

u
o
p

u
o
p

u
o
p

u
o
p

40

mf

mf

mf

mf

50

mp

mp

mp

mp

Fig. 21 Detalle de la partitura cantada por el coro Universitario (UNAM) invitado para el performance sonoro.

La presentación en el espacio expositivo tenía que mostrar la obra resultante del proceso de investigación a manera de síntesis, pero también tenía que mostrar el proceso y socializarlo con el público. La forma que tomó en la galería fue la de “laboratorio-instalación” un concepto nuevo en la obra del autor que se ha seguido presentando y será pieza clave en el proyecto central que se analiza a detalle en esta tesis.

La obra síntesis consta de dos partes. La primera es una placa totémica con las formas geométricas utilizadas en los chips, una obra que expone de manera estética un código computacional que, si bien es funcional, en la presentación aparece encriptado al público, a la manera de la tradición de código ofuscado. Sobre esta pieza se proyecta un *video mapping* generativo que tiene como semilla de comportamiento los datos recogidos de los chips genéticos. Por otro lado, el sonido está compuesto por las 8 grabaciones de la meditación activa espacializados en un sistema de sonido envolvente cuadrafónico, de igual manera, los comportamientos de la espacialización están alimentados por los datos del análisis espectral realizado¹⁷. Se utiliza una técnica de espacialización desarrollada por el autor conocida como síntesis granular espectral, misma que se detallará más tarde (Fig. 22). Pero la obra desborda el espacio expositivo, no solo está compuesta de objetos materiales, sino de relaciones interpersonales y una ecología de conocimientos que simplemente no pueden permanecer en un museo expuestos.

Para comenzar a abordar técnica y conceptualmente todo el problema, se constituyó un seminario de cómputos no convencionales que tuvo su sede en el Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM, en donde participaron dos estudiantes de la maestría en biología molecular y genómica de la Facultad de Ciencias, Román Castillo e Ileana de la Fuente; un estudiante del doctorado en tecnología musical, Carles Tardío; un biólogo, ingeniero en electrónica y en sistemas así como bioartista y biohacker Cristian Delgado. También se contó con la asesoría de la doctora

¹⁷ Registro audiovisual de la obra en <https://vimeo.com/305807215>

Cladua Segal, así como del apoyo del laboratorio de biología molecular y genómica de la Facultad de Ciencias de la UNAM para el trabajo con organismos modificados genéticamente. El desarrollo de herramientas para ingeniería genética siguió su camino para consolidarse como un espacio de bioarte y biohacking que da cursos, diplomados e incluso ha servido como laboratorio de prácticas a alumnos de instituciones como la Universidad de la Ciudad de México que abrió la carrera de ciencias genómicas sin laboratorios. Y la investigación de computadoras de bacterias sigue su curso sirviendo de plataforma para otros artistas y para nuevas obras de arte. Todo este bagaje se intentó socializar al público con dos activaciones durante la exposición del Programa de Apoyo a la Producción e Investigación en Arte y Medios 2016 realizada en 2018 en el Centro Nacional de las Artes de la Ciudad de México, una fue el aislamiento de bacterias *Vibrio Fischeri* y la segunda la extracción de ADN humano y su impresión, ambos como talleres abiertos al público. Esta obra siempre será una obra en proceso.

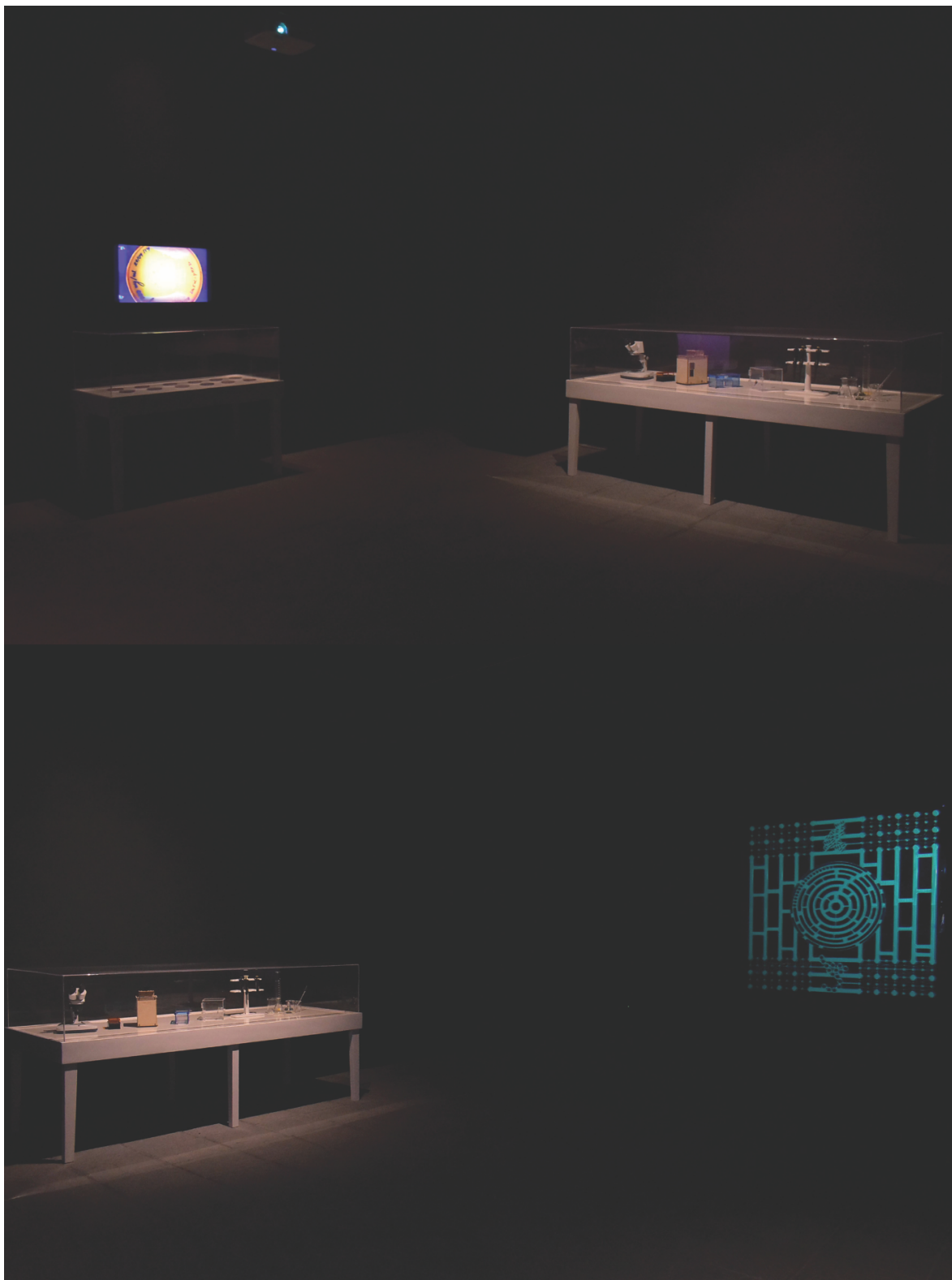


Fig. 22 Instalación de Pulcher Aureus Filum en la muestra del Programa de Apoyo a la Producción e Investigación en Arte y Medios 2016 montada en el Centro Nacional de las Artes en 2018.

2. Computadoras químicas

Una vez establecidas la naturaleza, técnicas y metodologías de los cómputos de sustrato biológico nos abocaremos a explicar el paradigma de cómputo que da título a este trabajo, las computadoras químicas, chips que trabajan con el oscilador Belousov-Zhabotinsky (BZ). Estos chips conjuntan tres cualidades que otros paradigmas tienen por separado, esto los hacen tan versátiles y poderosos: Son computadoras líquidas, de reacción-difusión y basadas en colisiones.

2.1 Computadoras líquidas

“Se puede utilizar un líquido para representar señales, activar dispositivos informáticos mecánicos y modificar señales mediante reacciones químicas... Estas incluyen calculadoras hidráulicas, computadoras fluídicas, dispositivos microfluídicos, *droplets*, canicas líquidas y computadoras químicas de reacción-difusión.” (Adamatzky, 2018).

Los dispositivos hidráulicos se han desarrollado desde hace miles de años debido a el florecimiento de civilizaciones que tuvieron la necesidad de llevar agua para todos sus propósitos, pero los dispositivos para realizar operaciones matemáticas se pueden rastrear a partir de 1900 con varios tipos de máquinas hidráulicas algebraicas, como la máquina para extraer la raíz n de cualquier número, al desplazar agua con un dispositivo parabólico. (Fig. 23)

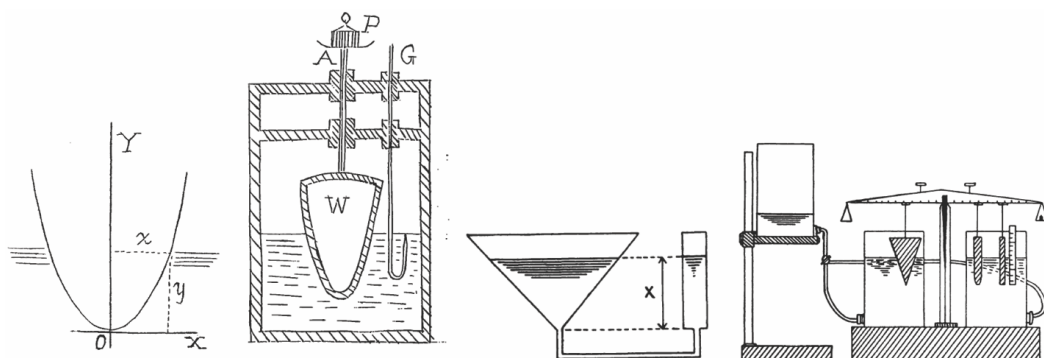


Fig. 23 Ilustración del método hidráulico del cálculo de la raíz n de cualquier número propuesto por Arnold Emch en 1901.

Retomando la idea central de este proyecto sobre ¿Cómo cambiaría la forma de una computadora hidráulica si el problema a resolver no fuera la entrada y salida de dinero en un país? En los 30 se inventa una computadora “diseñada para imitar la transferencia de calor, no resolviendo ecuaciones diferenciales a mano o con calculadoras existentes, sino mediante el modelado analógico de la propagación del calor con agua” (Adamatzky, 2018). En este caso los niveles de agua en los recipientes no representan dinero en tipos de cambio, tipos de interés, ahorros, inversiones, gastos gubernamentales, impuestos, importaciones y exportaciones, sino que “representan la diferencia de temperaturas de los materiales de construcción y el aire. El área de corte de los vasos representa una capacidad térmica de capas. La resistencia hidráulica de los tubos que conectan los recipientes es análoga a la resistencia térmica de las capas de material simulado.” (Adamatzky, 2018). Y como lo podemos ver en la Fig. 24 la forma de las dos computadoras es diferente, los recipientes están montados en distintos lugares y formaciones, así como las mangueras que los comunican¹⁸.

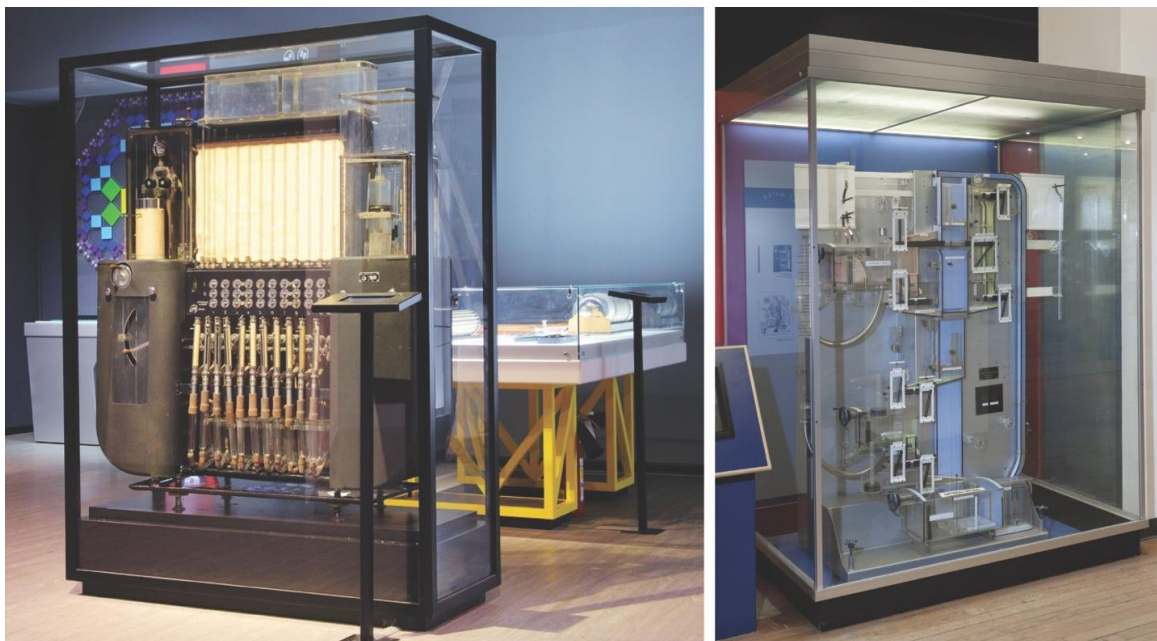


Fig. 24 Modelo no. 3 del integrador hidráulico de Lukyanov (izquierda). Computadora hidráulica MONIAC (derecha).

¹⁸ Esto es más claro en computadoras de propósito específico, aunque también sucede en las computadoras de propósito general con arquitectura Princeton, como en el caso de las diferencias formales entre el microprocesador y las GPU's o tarjetas gráficas.

En los 50's se desarrolla la MONIAC, en los 60' se desarrollan todo tipo de calculadoras lógicas y para mediados de los 80's llega la investigación de L. Kuhnert y su equipo, quienes procesan imágenes a partir de ondas químicas sensibles a la luz (el oscilador BZ). Describen su experimento de la siguiente manera:

“El procesamiento de imágenes generalmente se relaciona con la manipulación y el análisis de imágenes por computadora. Los típicos procesamientos de imágenes por computadora están relacionados con la mejora de imágenes degradadas (de bajo contraste o ruidosas), la restauración y reconstrucción, la segmentación de imágenes en partes y el reconocimiento de patrones de las propiedades de las imágenes preprocesadas. Para resolver estos problemas, las operaciones locales procesan las imágenes digitalizadas de manera secuencial. Aquí describimos un sistema químico especial sensible a la luz, una variante del medio Belousov-Zhabotinsky, en el que los frentes de reacción química ("ondas químicas") pueden ser modificados por la luz. La proyección de un semitono en un medio de este tipo inicia una respuesta muy compleja.” (Kuhnert, L., Agladze, K. y Krinsky, V., 1989).

Fig 25. Después de esta investigación comenzó a desarrollarse el paradigma de cómputo BZ, además de la microfluídica.



Fig. 1 Light-sensitive BZ reaction (composition 1; Table 1) with a negative image projected onto it. Frame 1: appearance of an image; 2, 3: positive image; 4, 5: negative image; 6: transient phase. The cycle shown here then recurs.

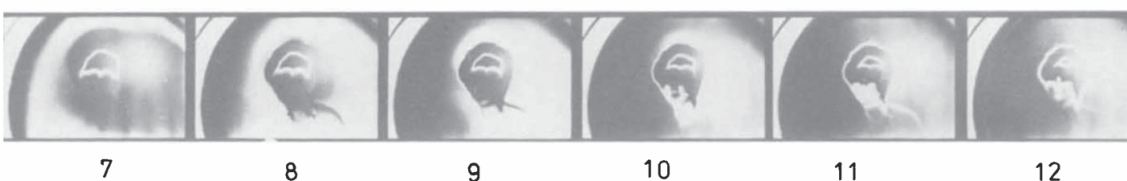
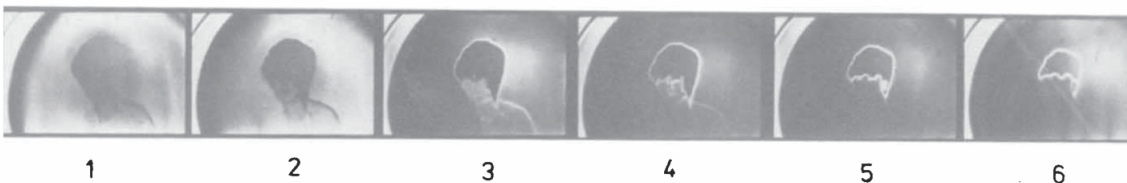


Fig. 2 Image-contour discernment. Same projection as in Fig. 1, but using reagent composition 2 (Table 1). Frames 1, 2: positive image; 3, 4: the dark portion of the image acquires contours; 5-8: erosion of the contour images by trigger waves, which is the mechanism of skeletonizing; 9, 10: formation of a new contour outside the former retracting one; 11, 12: the two retracting contours now fit into one another.

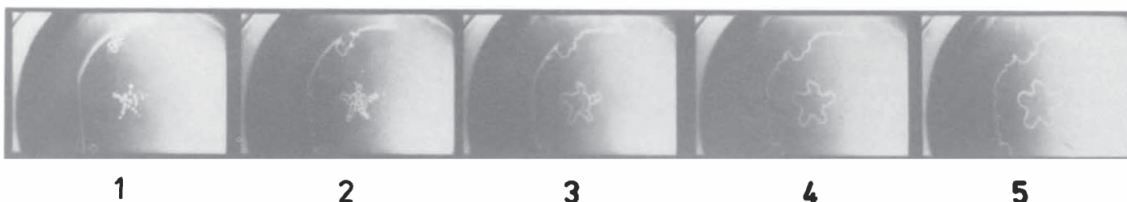


Fig. 3 Smoothing of a discontinuous image. The image, consisting of separate black points against a bright background, was projected on a Petri dish containing the light-sensitive BZ component of composition 2. Frame 1: an image appears as light points against the dark background; 2: each point becomes a source of a propagating concentric wave; 3: waves merge, producing a smoothed image; 4, 5: the image grows in size, and the degree of smoothing increases.

Fig. 25 Primer experimento de Belousov-Zhabotinsky como herramienta de cómputo en procesamiento de imágenes.

2.2 Computadoras de reacción-difusión

“Una computadora de reacción-difusión es un sistema químico extendido espacialmente, que procesa información transformando un perfil de concentración de entrada en un perfil de concentración de salida de una manera determinista y controlada. En las computadoras de reacción-difusión, los datos están representados por perfiles de concentración de reactivos, la información se transfiere mediante la propagación de ondas de fase y difusión, el cálculo se implementa a través de la interacción de estos patrones de viaje (ondas de difusión y excitación) y los resultados

del cálculo son registrados como un perfil de concentración final... y la lógica se puede resolver codificando datos dentro de los estados transitorios de un medio químico y programando la dinámica y las interacciones de las ondas químicas” (Adamatzky y Costello, 2012).

En otras palabras, los sistemas de reacción-difusión describen la manera en la que dos sustancias ocupan un espacio y se difunden en él a partir de una relación química que las emparenta, pero esto no solo se refiere a paradigmas químicos, la microfluídica, las computadoras de Physarum y las computadoras de neuronas también entran en esta clasificación.

Se puede decir que la idea de computación física es atribuida a Joseph Plateau, que en el siglo XIX desarrolla su experimento en donde coloca burbujas de jabón en medio de árboles de Steiner y con el paso del tiempo éstas se secan resolviendo las distancias mínimas entre los puntos, hoy en día se le conoce a este algoritmo como convex hull. Y si bien el jabón no es un sistema de reacción-difusión es una metodología análoga. Pero es hasta finales del siglo XX que se desarrolla este tipo de computación propiamente dicha:

“los estudios en computación de reacción-difusión fueron impulsados por algoritmos de computación espacial en autómatas celulares, cuando se diseñó el primer modelo de autómata para la construcción del diagrama de Voronoi. El algoritmo se implementó posteriormente en condiciones experimentales de laboratorio utilizando un procesador químico de precipitación, y más tarde se descubrió que una variedad de sistemas químicos de precipitación eran capaces de realizar una aproximación del diagrama de Voronoi. Los sistemas de precipitación también demostraron ser eficientes en la realización de puertas lógicas básicas, incluidas puertas de muchos valores.” (Adamatzky et al., 2012).

Los sistemas de reacción-difusión están basados en medios excitables. Un medio excitable

“se entiende como un sistema compuesto por elementos individuales excitables, cada uno de los cuales tiene el mismo estado estacionario y el mismo umbral de excitación.

Dichos elementos se hallan acoplados a sus vecinos inmediatos mediante procesos difusivos, los cuales permiten que se propaguen los potenciales de acción... el todo se encuentra integrado por elementos que individualmente son osciladores” (Sánchez, 2006).

¿Qué significa esto? Pongamos un ejemplo menos abstracto, un bosque, un territorio lleno de árboles. Digamos que en un año de sequía en alguna parte de este bosque ocurre un incendio, esto puede ser considerado como un medio excitable. Analicemos parte por parte, los “elementos excitables” son los árboles que potencialmente pueden incendiarse y mientras no haya las condiciones, mantienen el estado estacionario. Por otro lado, pueden oscilar entre estar incendiándose y no. En esta posibilidad de ser quemados, y en otras más, se hallan acoplados por su entorno, y los procesos difusivos dependerán de sus condiciones de cercanía, el viento, la humedad, etc. La energía se inyecta de manera uniforme y se disipa de manera fractal. (Bak, Chen y Tang, 1990) Comienza el fuego y empieza a expandirse por todo el bosque y cada uno de los árboles no podrá ser quemado de nuevo hasta que vuelva a crecer, por otro lado, si hay dos comienzos de fuego en dos partes diferentes los frentes de difusión no podrán penetrar el uno al otro.

Una de las herramientas más utilizadas y modeladas en estos tipos de cómputo son los autómatas celulares definidos como

“Redes uniformes regulares de máquinas o células de estados finitos conectadas localmente. Las células toman estados discretos y actualizan sus estados simultáneamente en tiempo discreto. Cada celda elige su siguiente estado dependiendo de los estados de sus vecinos más cercanos. Las reglas de transición del estado de la celda son muy simples e intuitivas, pero permiten codificar una dinámica espacio-temporal no trivial. Por lo tanto, los autómatas celulares son una herramienta ideal para la creación rápida de prototipos de modelos de medios no lineales, computadoras paralelas masivas y máquinas matemáticas.” (Adamatzky, 2013).

Una de las aplicaciones que hacen uso de esta cualidad de cómputo, así como sus herramientas conceptuales de cómputo paralelo es el controlador robótico desarrollado por Hiroshi Yokoi y su equipo:

“implementación experimental de un controlador químico para una mano robótica. En el presente estudio de caso, hemos diseñado un sistema cerrado en el que un reactor químico de capa fina Belousov-Zhabotinsky (BZ) se conectó a la mano robótica a través de una serie de fotosensores y los dedos de la mano pudieron estimular la dinámica de excitación. en el medio BZ mediante la adición local de una especie activadora. Un circuito de trabajo principal del sistema quimio-robótico es que los frentes de ondas de oxidación que viajan en el medio son detectados por fotosensores y hacen que (a través de un microcontrolador) los dedos de la mano se doblen. Cuando un dedo se dobla, está configurado para aplicar una pequeña cantidad de plata coloidal a la reacción y, por lo tanto, provoca una onda de excitación adicional. Las ondas viajeras e interactivas estimulan los movimientos adicionales de los dedos y se observan patrones de comportamiento. Estos patrones de comportamiento se han modelado utilizando un autómeta celular.” (Yokoi, Adamatzky, Costello y Melhuish, 2004). Fig. 25.



Fig. 26 Mano robótica controlada por el oscilador Belousov-Zhabotinsky.

2.3 Computadoras basadas en colisiones

“La computación basada en colisiones es una implementación de circuitos lógicos, máquinas matemáticas u otros dispositivos informáticos y de procesamiento de información en medios homogéneos, uniformes y no estructurados con localizaciones móviles itinerantes. Un quantum de información está representado por un patrón de propagación compacto (planeadores en autómatas celulares, solitones en sistemas ópticos, fragmentos de ondas en sistemas químicos excitables). El valor de verdadero en esta lógica corresponde a la presencia de la localización, El valor de falso a la ausencia de la localización; Los valores lógicos también se pueden representar mediante un estado particular de la localización. Cuando chocan dos o más localizaciones en movimiento, cambian sus vectores y/o estados de velocidad. Las trayectorias posteriores a la colisión y/o los estados de las localizaciones representan los resultados de las operaciones lógicas implementadas por la colisión. Una de las principales ventajas del medio informático basado en colisiones, oculto en los sistemas 1D, pero obvio en los medios 2D y 3D, es que el medio no tiene arquitectura:

nada está cableado, no hay cables o puertas estacionarios, una trayectoria: La propagación de cuantos de información puede verse como un cable momentáneo... La idea de la computación basada en colisiones se basa en estudios que tratan sobre colisiones de señales que viajan a lo largo de cadenas discretas, en un autómata celular unidimensional.” (Adamatzky y Durand, 2012).

Uno de los primeros trabajos en este campo fue *A One-Dimensional Real-Time Iterative Multiplier* de Atrubin, una multiplicadora basada en un autómata celular de una dimensión en 1965 y el artículo *Generation of Primes by a One-Dimensional Real-Time Iterative Array* de Fischer, un generador de números primos a partir de un autómata celular de una dimensión, ambos de 1965.

Otra forma popular de llamarle a este tipo de cómputo es computadoras de bolas de billar o computadoras de balística que surgió a partir de un trabajo de Edward Fredkin y Tommaso Toffoli *Conservative Logic*:

“La lógica conservadora está en una mejor posición para proporcionar indicaciones sobre la realización de sistemas informáticos de alto rendimiento, es decir, de sistemas que hacen un uso muy eficiente de los "recursos informáticos" realmente ofrecidos por la naturaleza. En particular, la lógica conservadora muestra que es idealmente posible construir circuitos secuenciales con cero disipación de potencia interna... Este modelo se basa en colisiones elásticas de "bolas" idénticas y, por tanto, es formalmente idéntico al modelo atómico que subyace a la teoría cinética (clásica) de los gases perfectos. Literalmente, el comportamiento funcional de una computadora digital de uso general puede ser reproducido por un gas perfecto colocado en un recipiente de forma adecuada y dadas las condiciones iniciales apropiadas.” (Fredkin y Toffoli, 1981).

Este particular trabajo hace evidente uno de los principales motivos de la generación de modelos alternativos de cómputo. La ley de Moore, es decir, la miniaturización de los procesadores y su aumento en potencia de cálculo tiene que lidiar con las leyes físicas de nuestro mundo ¿Qué quiere decir esto? En un espacio más pequeño (por lo tanto, con menos materia) se tiene que usar de manera más

eficiente la energía necesaria para cada uno de los recursos informáticos de un algoritmo determinado, pero este modelo tiene un límite por razones evidentes. No se puede miniaturizar algo de manera infinita y por otro lado el consumo energético que esto conllevaría es insostenible, más aún dentro de la crisis ecológica que vivimos hoy en día. Por lo tanto, investigaciones como la de la lógica conservativa son importantes hoy en día, no solo en el mundo de las ciencias de la computación, sino en el esfuerzo por utilizar los recursos que tenemos a nuestra disposición en la naturaleza.

El principio de este paradigma de cómputo se basa en un espacio poblado con localizaciones móviles y estacionarias, en donde las localizaciones móviles representan señales y las estacionarias las rutas por donde viajarán esas señales. Las localizaciones móviles utilizadas en cómputo hasta este momento son: bolas de billar, osciladores en modelos de autómatas celulares, solitones en medios no lineales y ondas localizadas en medios químicos excitables. Las localizaciones estacionarias son: Vidas estáticas y comedores en el juego de la vida de Conway, ondas estacionarias en modelos autómatas de reacción-difusión y respiradores en dispositivos informáticos basados en cadenas de polímeros y osciladores en materiales granulares vibrantes. (Adamatzky et al., 2012).

En la (Fig. 27) vemos un ejemplo de señales viajando y ruteadas. a) una señal viajando al norte, b) La señal se ramifica sin impurezas: un fragmento de onda que viaja hacia el este se divide en dos fragmentos de onda (que viajan hacia el sureste y el noreste) cuando choca con un fragmento de onda más pequeño que viaja hacia el oeste, c) La señal se ramifica con impureza: el fragmento de onda que viaja hacia el oeste se divide por la impureza (que se muestra a la derecha) en dos ondas que viajan al noroeste y al suroeste. (d) Enrutamiento de la señal (cambio de sentido) con impurezas: el fragmento de onda que viaja hacia el este es dirigido hacia el norte y luego hacia el oeste por dos impurezas (mostradas a la derecha). Un reflector de impurezas consta de cadenas inhibitoras (gris) y excitadoras (negras) de sitios de cuadrícula. (Adamatzky et al., 2012).

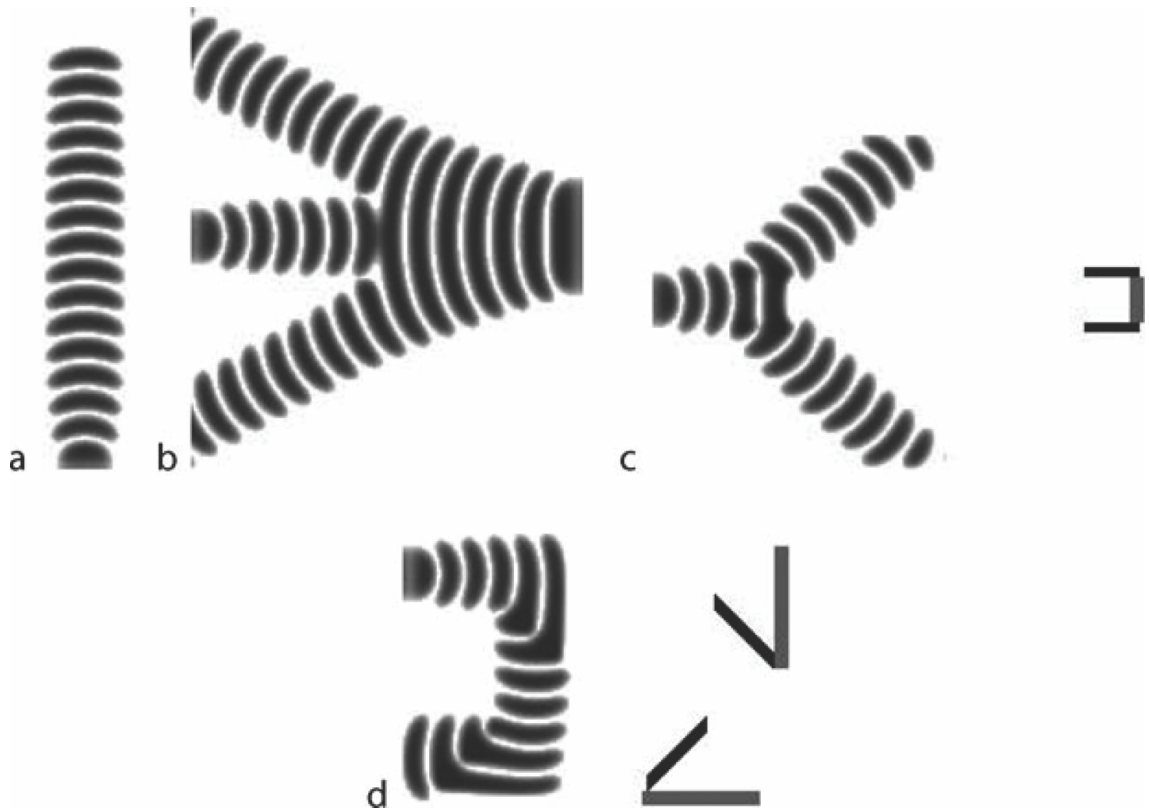


Fig. 27 Diagrama de sistemas de colisiones como compuertas lógicas.

2.4 Reacción Belousov-Zhabotinsky

2.4.1 Historia

“La historia comienza alrededor de 1950 con la obra de B.P. Belousov, entonces ya de 57 años y jefe de un Laboratorio de Biofísica del Ministerio de Salud de la URSS. Belousov había estudiado química en Zurich antes de la Revolución de octubre de 1917 y fue profesor de química en la URSS antes de la Segunda Guerra Mundial. Sus intereses incluían la bioquímica, y 1950 lo encontró esforzándose por modelar la catálisis en el ciclo de Krebs utilizando el ión metálico cerio en lugar de los iones metálicos unidos a proteínas comunes en las enzimas de las células vivas. El ciclo de Krebs es una parte universal del metabolismo mediante el cual los residuos de acetilo se oxidan a dióxido de carbono en las mitocondrias. Se llama "ciclo" no porque oscile en el tiempo, sino simplemente porque la secuencia de reacción conduce en un círculo, como en cualquier ciclo geoquímico. Para sorpresa de Belousov, su caricatura de probeta, una solución de ácido cítrico en agua con bromato acidificado como

oxidante e iones céricos amarillos como catalizador, se volvió incolora y volvió a amarillo periódicamente durante una hora (a temperatura ambiente) mientras desprendía dióxido de carbono por efervescencia.

Belousov realizó un estudio serio de esta peculiaridad, midiendo, por ejemplo, los efectos de la temperatura y la acidez en el período del oscilador. Señala que el oscilador se apaga cuando se agota el oxidante (bromato) o el sustrato orgánico (citrato), y se reanuda cuando se restaura el ingrediente faltante. Presenta un esquema tentativo para el mecanismo de reacción. Agradece a Safronov por perfeccionar la receta dada y por sugerir hierro fenantrolina (ferroína) como un indicador/catalizador de color superior. Incluye fotografías secuenciales junto con un cronómetro e incluso trazos oscilográficos que muestran detalles del curso del tiempo en alta resolución. Informa sobre la construcción de un gradiente vertical del período del oscilador local en un cilindro graduado y su autoorganización en estratos horizontales de color alterno.” (Winfree, 1984).

Como todos los descubrimientos revolucionarios de la historia, este fue rechazado para su publicación en un par de ocasiones, la primera en 1951 por un malentendido con la ley de la termodinámica y de nuevo 6 años después lo que hizo que Belousov dejara a un lado ese trabajo, pero su protocolo quedó rondando en varios laboratorio de Moscú hasta que en 1959 algunos colegas le convencieron de publicar unas notas en las memorias de un congreso de radiación en medicina que aparecieron sin citas y sin muchas demostraciones. Años después este protocolo llega a las manos de un estudiante de la Universidad Estatal de Moscú, que con su investigación da inició al interés por este oscilador en el mundo de la ciencia. Anatol Zhabotinsky publica en 1964 los resultados de su investigación sobre este oscilador con el beneplácito de Borís Pávlovich Belousov (Winfree 1984).

Uno de los primeros artículos que expande el alcance de esta reacción química fuera de la Unión Soviética es el artículo *Evidence of a Branched Chain Reaction in the Oscillating Reaction of Hydrogen Peroxide, Iodine and Iodate* de H. Degn de la

Universidad de Copenhagen. Describe en inglés por primera vez la fórmula de Belousov

“ácido malónico, sulfato cérico y bromato de potasio diluidos en ácido sulfúrico” (Degn 1967). Y en 1972 se describe el mecanismo FKN, en donde se aclara en malentendido termodinámico y se hace el primer guiño a la computación química “En cualquier sistema cerrado homogéneo a temperatura y presión constantes, un cambio químico espontáneo debe ir acompañado indudablemente de una disminución de la energía libre de Gibbs del sistema. Las concentraciones de especies químicas individuales en tal sistema generalmente varían monótonamente con el tiempo o pasan a través de máximos o mínimos únicos. Sin embargo, la restricción del cambio monótono de energía libre no excluye la oscilación repetida en las concentraciones de constituyentes específicos ... Las reacciones oscilantes hipotéticas por ellos generalmente involucran dos reacciones autocatalíticas que se encienden y apagan entre sí de una manera análoga al conocido circuito "flip-flop" en electrónica.” (Field, Körös y Noyes 1972).

Sus ecuaciones fueron muy complejas para hacer un análisis numérico por las computadoras de la época, pero después, lograron simplificarlas en un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de sólo 3 variables y las bautizaron como el *Oregonator*. Es a partir de esta publicación que se inicia una segunda etapa en la investigación de este tipo de sistemas químicos no lineales en occidente, que culminó con el artículo que abiertamente enuncia la computación química *Image processing using light-sensitive chemical waves* en 1989. (Kuhnert et al., 1989)

2.4.2 Reactivos

Hasta este punto hemos descrito a profundidad el contexto del oscilador químico que permite implementar una computadora química, pero ¿Qué es? ¿Cómo funciona? Nos basaremos en el protocolo descrito en los reportes de cursos del laboratorio David Kleinfeld de la Universidad de California, campus San Diego, que fue el protocolo mostrado al autor por la maestra María Alicia Falcón Neri y la doctora Gertrudis Hortensia González Gómez del Laboratorio de Biofísica Funcional

del Tlahuizcalpan en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

“La reacción BZ es en realidad un sistema de varias reacciones químicas con docenas de pasos elementales, pero el proceso general es la oxidación del ácido malónico por el bromato que produce dióxido de carbono. A medida que el sistema avanza lentamente hacia el equilibrio, las concentraciones de varios de los reactivos intermedios oscilan mientras las concentraciones de productos se mueven monótonamente hacia el equilibrio.” (Hill y Morgan, 2003).

No existe una única fórmula para activar esta reacción y las concentraciones de cada uno de los reactivos dependen de los propósitos de cada uno de los experimentos que se puedan llevar a cabo relacionados con la cantidad de luz, temperatura ambiente, presión, y contenedor. En el caso de este proyecto los reactivos son los siguientes.

1. Bromato de Sodio¹⁹ (NaBrO₃)
2. Bromuro de Sodio²⁰ (NaBr)
3. Ácido malónico²¹ (C₃H₄O₄)

¹⁹ El bromato de sodio es una sal que contiene los iones bromato y sodio. Es un oxidante fuerte, por lo que posee cierta toxicidad. Se usa principalmente en procesos de coloración en continuo o por lotes en los que intervienen tintas de azufre, y como permanente para el pelo, agente químico, o disolvente de oro en minería, cuando se emplea junto con bromuro sódico. (https://es.wikipedia.org/wiki/Bromato_de_sodio)

²⁰ El bromuro de sodio o bromuro sódico es una sal inorgánica. Tiene un alto punto de fusión y su estructura cristalina es cúbica, similar a la del cloruro sódico. Es usualmente empleada como fuente de bromo en síntesis orgánica. El bromuro de sodio es preparado mediante la reacción del hidróxido de sodio con el ácido bromhídrico. Cristaliza en el sistema cúbico al igual que otras sales haloideas tales como el NaCl, NaF o NaI. El bromuro tiene propiedades antiepilépticas por lo que las sales como el NaBr o KBr han sido empleadas durante el siglo XIX y principios del XX para tratar estos síntomas de distintos tipos de epilepsia como la catamenial, asociada a la menstruación, siendo hoy el fenobarbital la opción primera. Distintas sales de bromo, son empleadas en formulaciones de tabletas desinfectantes para piscinas. (https://es.wikipedia.org/wiki/Bromuro_de_sodio)

²¹ El ácido malónico (nombre IUPAC: ácido propanodioico) es un ácido dicarboxílico. A la forma ionizada del ácido malónico así como a sus ésteres y sales se les conoce como malonatos. Su nombre deriva de la palabra latina malum que significa manzana. El ácido malónico fue por primera vez preparado en 1858 por el químico francés Victor Dessaignes (1800-1885) vía la oxidación del ácido málico. Un derivado del ácido malónico, el malonil-CoA, es el precursor de la biosíntesis de ácidos grasos. El ácido malónico inhibe a la succinato deshidrogenasa en el ciclo del ácido cítrico. La sal cálcica del ácido malónico se encuentra en la

4. Tritón-X 100²² C₁₄H₂₂O(C₂H₄O)_n(n=9-10)

5. Ferroína²³ (C₃₆H₂₄FeN₆²⁺)

2.4.3 Protocolo de preparación de la reacción Belousov-Zhabotinsky

Preparación de los reactivos

Algunos de los reactivos se venden en presentación de polvo así que hay que disolverlos en una mezcla de ácido sulfúrico²⁴ (H₂SO₄) y agua.

raíz de remolacha. En una reacción bien conocida el ácido malónico se condensa con la urea para dar ácido barbitúrico. Sus ésteres, y en particular habitualmente el malonato de dietilo, son comúnmente usados para llevar a cabo reacciones de síntesis malónica. Así mismo, se usa como compuesto 1,3-dicarbonílico en la adición de Michael. La posterior hidrólisis y descarboxilación de uno de los grupos ácido carboxílico que se generan permite obtener la amplia y versátil familia de los compuestos 1,5-dicarbonílicos. Esta reacción es de amplio uso en el ámbito académico para plantear los conceptos de vinilología, adiciones 1,4 en carbonilos alfa,beta-insaturados, descarboxilación y la ya mencionada adición de Michael.

(https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_mal%C3%B3nico)

²² El tensoactivo no iónico Tritón-X 100 es un compuesto químico que tiene muchas aplicaciones en diversas disciplinas. Como agente humectante en los laboratorios de histología y microscopía se emplea en disolución diluida para humectar durante algunos protocolos de tinción y también se emplea durante la limpieza de cuchillas de diamante. En la industria electrónica se emplea como agente humectante de las tablillas para mejorar y acelerar algunos procedimientos y operaciones. El Tritón X-100 deja una fina capa en la superficie de la tablilla que puede ser eliminada empleando técnicas de retirada de recubrimientos o bien utilizando el grabador por plasma SPI Plasma Prep II empleando oxígeno durante la operación. En el campo de la biología molecular, se usa frecuentemente como un auxiliar de disolución para proteínas integrales en medios acuosos; no obstante, debe usarse a la concentración mínima posible con el objeto de no contaminar la muestra, lo que alteraría la determinación de trazas en espectroscopia de masas de la disolución resultante. Se usa también comúnmente en algunas formulaciones para polimerización de emulsiones. (https://es.wikipedia.org/wiki/Trit%C3%B3n_X-100)

²³ La ferroína es un compuesto químico con la fórmula [Fe(*o-phen*)₃]SO₄, donde *o-phen* es una abreviación para la 1,10-fenantrolina, un ligando bidentado. El término ferroína se utiliza en forma un tanto laxa, indicando también a sales de otros aniones tales como por ejemplo el cloruro. Este compuesto de coordinación se utiliza como indicador redox en química analítica. Es un indicador redox popular para hacer visibles las oscilaciones de la reacción Belousov-Zhabotinsky.

(<https://es.wikipedia.org/wiki/Ferro%C3%ADna>)

²⁴ El ácido sulfúrico es un compuesto químico extremadamente corrosivo. Es el compuesto químico que más se produce en el mundo, por eso se utiliza como uno de los tantos medidores de la capacidad industrial de los países. Una gran parte se emplea en la obtención de fertilizantes. También se usa para la síntesis de otros ácidos y sulfatos y en la industria petroquímica. Generalmente se obtiene a partir de dióxido de azufre, por oxidación con óxidos de nitrógeno en disolución acuosa. Normalmente después se llevan a cabo procesos para conseguir una mayor concentración del ácido. Antiguamente se lo denominaba aceite o espíritu de vitriolo, porque se producía a partir de este mineral. La molécula presenta una estructura

Bromato de sodio 100 ml a 0.9375 M (molar)

- Disolver en 50 ml de agua 14.147 g de bromato de potasio.
- Una vez disuelto el bromato de potasio, agregar 1.66 ml²⁵ de ácido sulfúrico.
- Por último, llevar al aforo de 100 ml.

Bromuro de sodio 100 a 0.25 M

- Disolver en 50 ml de agua 2.572 g de bromuro de sodio.
- Una vez disuelto el bromuro de sodio, agregar 1.66 ml de ácido sulfúrico.
- Por último, llevar al aforo de 100 ml.

Ácido malónico 100 ml a 0.9375 M

- Disolver en 50 ml de agua 9.756 g de ácido malónico.
- Una vez disuelto el ácido malónico, agregar 1.66 ml de ácido sulfúrico.
- Por último, llevar al aforo de 100 ml.

Tritón-X 100

- Disolver 1 ml de tritón en 99 ml de agua.

Ferroína 100 ml a 0.025 M

Dado que la ferroína es el marcador con el cual vamos visualizar las oscilaciones espacio-temporales de nuestro oscilador, se recomienda preparar la ferroína y no comprarla ya hecha, esto para poder controlar el color y concentración de nuestros

piramidal, con el átomo de azufre en el centro y los cuatro átomos de oxígeno en los vértices. Los dos átomos de hidrógeno están unidos a los átomos de oxígeno no unidos por enlace doble al azufre. Dependiendo de la disolución, estos hidrógenos se pueden disociar. En agua se comporta como un ácido fuerte en su primera disociación, dando el anión hidrogenosulfato, y como un ácido débil en la segunda, dando el anión sulfato. Tiene un gran efecto deshidratante sobre las moléculas hidrocarbonadas como la sacarosa. Esto quiere decir que es capaz de captar sus moléculas en forma de agua, dejando libre los átomos de carbono con la consiguiente formación de carbono puro.
(https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_sulf%C3%BArico)

²⁵ Esta cantidad fue medida con un ácido a 96% de pureza. 98.08 g de peso molecular. 1.84 g/ml de densidad absoluta.

patrones. Es importante poder controlar estas variables debido a que la manera en que vamos a sacar señal de nuestros chips químicos es a través de un algoritmo de inteligencia artificial conocido como visión computarizada, lo quiere decir que será el análisis de color de una cámara web el que nos permitirá obtener datos por lo que el control de esta variable es recomendable.

- Disolver 1.485 g de 1,10-fenantrolina²⁶ (C₁₂H₈N₂) en 50 ml de agua.
- Agregar 0.695 g de sulfato ferroso heptahidratado²⁷ (FeSO₄·7H₂O) y disolverlo.
- Una vez disueltos los dos reactivos agregar 1.66 ml de ácido sulfúrico.
- Por último, llevar al aforo de 100 ml.

Este reactivo es fotosensible por lo que esta solución debe ser protegida de la luz, ya sea en un frasco ámbar o un contenedor cubierto por papel aluminio.

2.4.4 Preparación de la reacción

²⁶ La 1,10-fenantrolina, o-fenantrolina o simplemente fenantrolina (phen) es un compuesto orgánico heterocíclico. Es un sólido de color blanco que es soluble en disolventes orgánicos. Se utiliza como un ligando en la química de coordinación, ya que forma complejos fuertes con la mayoría de los iones metálicos. En términos de sus propiedades de coordinación, phen es similar a la 2,2'-bipiridina (bipy). A temperatura ambiente es estable en la forma de monohidrato como un sólido blanco inodoro. Es un compuesto tóxico, peligroso para el medio ambiente. En combinación con iones de hierro, se usa como un indicador redox; tres moléculas de fenantrolina forma un complejo metálico con un ion Fe(II) ("ferroso") de color rojo, cuya forma correspondiente oxidada da lugar a un color azul. La fenantrolina se puede preparar mediante dos reacciones de Skraup sucesivas de glicerol con "o"-fenilendiamina, catalizadas por ácido sulfúrico, y un agente oxidante, tradicionalmente ácido arsénico acuoso o nitrobenzeno. La deshidratación del glicerol da acroleína que se condensa con la amina seguida de una ciclación. (<https://es.wikipedia.org/wiki/1,10-fenantrolina>)

²⁷ El sulfato de hierro(II) es un compuesto químico iónico. También llamado sulfato ferroso, caparrosa verde, vitriolo verde, vitriolo de hierro, melanterita o Szomolnokita, el sulfato de hierro(II) se encuentra casi siempre en forma de sal heptahidratada, de color azul-verdoso. En el proceso de acabado del acero antes de la galvanoplastia o el recubrimiento, la lámina, la hoja o la barra de acero se pasa a través de un baño decapante de ácido sulfúrico. Este tratamiento produce grandes cantidades de sulfato de hierro(II) como producto. Otra fuente de grandes cantidades de esta sustancia es la producción de dióxido de titanio a partir del mineral ilmenita. Comercialmente se prepara para la oxidación de la pirita, o tratando hierro con ácido sulfúrico. El sulfato ferroso se usa para purificación de agua por floculación y para eliminar fosfatos en las plantas de depuración municipales e industriales para prevenir la eutrofización de masas de agua superficiales. Grandes cantidades de esta sal se usan como agente reductor, sobre todo para la reducción de cromatos en cemento. ([https://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_hierro_\(II\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_hierro_(II)))

Las siguientes cantidades son para preparar la reacción en una placa de Petri de 10 mm Para otras áreas se tiene que recalcular. Es importante tener un film delgado para poder visualizar el oscilador de una manera óptima.

- En un vaso de precipitados.
- Agregar 2 ml de Bromato de Sodio.
- Agregar 1.25 ml de bromuro de sodio.
- Agregar 2 ml de ácido malónico.
- La solución se tornará amarilla por la participación del Bromo.
- Una vez que vemos amarilla la solución, esperar 5 minutos hasta que desaparezca el color.
- Agregar 1 gota de Tritón (entre 2 y 3 μ l aproximadamente).
- Agregar 1 ml de ferroína.
- Vaciar toda la mezcla en una caja de Petri y esperar la formación de ondas.

2.4.5 Funcionamiento de la reacción e interacción de sus elementos

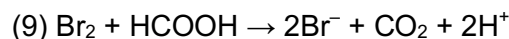
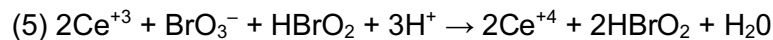
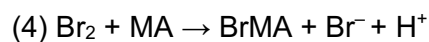
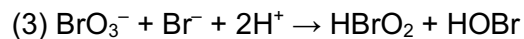
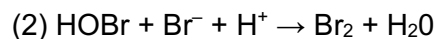
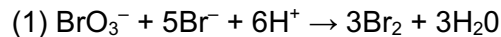
El mecanismo FKN junto al sistema de ecuaciones Oregonator es la primera descripción detallada y formal de la reacción BZ. Como escapa al tema de esta tesis solo citaremos el resumen de este mecanismo de funcionamiento para terminar de describir la versión de esta reacción hecha por los investigadores Hill y Morgan.

“El siguiente es un resumen del desarrollo del comportamiento oscilatorio: Normalmente, el bromuro reduce el bromato. Esta reacción es rápida y consume rápidamente el bromuro disponible. Una vez que el bromuro cae por debajo de un nivel crítico, el ácido bromoso se hace cargo de la reducción del bromato en una reacción que autocatalíticamente produce más ácido bromoso. Esto conduce a un crecimiento exponencial de $[\text{HBrO}_2]$. Esto finalmente se controla mediante una reacción que convierte el HBrO_2 en HOBr y bromato. Mientras tanto, la

descomposición del ácido malónico da como resultado la reducción del bromo a bromuro, casi restaurando la concentración inicial y permitiendo que todo el proceso comience de nuevo.

Gran parte de nuestra comprensión de la reacción BZ se deriva del mecanismo FKN. A continuación, se muestra una descripción general del mecanismo FKN.

Los pasos clave son:



Puntos importantes:

- Cuando $[\text{Br}^-]$ es alto, (1) domina la reducción de bromato
- Cuando $[\text{Br}^-]$ es bajo, (5) domina la reducción de bromato
- (5) incluye la producción autocatalítica de HBrO_2 ; cuando (5) es dominante, HBrO_2 aumenta exponencialmente hasta que está limitado por (6)
- (7), (8) y (9) son los procesos finales, oxidando el ácido malónico y bromomalónico
- Las velocidades de (7), (8) y (9) son mucho más lentas que las de las otras reacciones
- También se produce ácido malónico bromado doble y triple, pero en concentraciones mucho más pequeñas que la BrMA , por lo que el mecanismo FKN los ignora. Se oxidarían de manera similar a BrMA

Las oscilaciones ocurren de la siguiente manera: El proceso (1) reduce la concentración de bromuro y aumenta el bromo, lo que permite la bromación del ácido malónico por (3). Cuando $[\text{Br}^-]$ se ha reducido significativamente, (5) provoca un aumento exponencial del ácido bromoso y la forma oxidada del catalizador e indicador de iones metálicos, el cerio. El ácido bromoso se convierte posteriormente en bromato y HOBr . Mientras tanto, los pasos que limitan la velocidad (7), (8) y (9) reducen el

cerio a Ce^{+3} y simultáneamente aumentan la concentración de bromuro. Una vez que la concentración de bromuro es lo suficientemente alta, reacciona con bromato y HOBr en (1) y (2) para formar bromo, y el proceso comienza de nuevo. Los diferentes espectros de absorción de los dos estados de ionización del cerio hacen que la solución cambie de amarillo a transparente y viceversa a medida que cambian sus concentraciones relativas, lo que permite observar visualmente las oscilaciones.

Los patrones espaciales bidimensionales pueden formarse espontáneamente o por estimulación, dependiendo de la configuración del experimento. Cuando la reacción nuclea en un punto, la difusión trae bromuro desde la región circundante al punto de nucleación. Esto facilita el mecanismo de reajuste en el punto de nucleación mientras simultáneamente permite que el proceso (5) domine en la región circundante, oxidando el catalizador de iones metálicos y perpetuando el frente de menor concentración de bromuro. De esta manera, una onda circular progresará hacia afuera desde el punto de nucleación. Si las condiciones son tales que las oscilaciones continuarán, una segunda onda circular comenzará en el punto de nucleación y el resultado final serán muchos anillos concéntricos en un "patrón blanco (*target*)". Si el punto de nucleación no continúa oscilando, un solo frente de onda se expandirá hasta que sea aniquilado en el borde del contenedor. Field y Noyes descubrieron experimentalmente que la velocidad del frente de onda viene dada por:

$$v = 0.04 \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}\text{M}^{-1}([\text{H}^+][\text{BrO}_3^-])^{1/2}$$

Además, la velocidad de propagación del frente depende de la curvatura. Para patrones blanco muy pequeños, la curvatura es relativamente alta y esto ralentiza el progreso de la reacción porque la difusión desde un punto es menor que la difusión desde una línea. Esta dependencia viene dada por la ecuación eikonal:

$$v^* = v + DK$$

donde D es la constante de difusión (del orden de $10^{-5} \text{ cm}^2\text{sec}^{-1}$), $K = \pm r^{-1}$ es la curvatura (positiva para un círculo en contracción y negativa para un círculo en expansión), y v es la velocidad de propagación para la reacción con curvatura cero.

Usando las ecuaciones anteriores y los números típicos para las concentraciones de hidrógeno y bromato y D, podemos estimar v y v^* . Tomando los siguientes valores:

$$[\text{BrO}_3^-] = 0.3 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.25 \text{ M}$$

$$D = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

resulta en:

$$v = 6.5727 \text{ mm/min}$$

$$v^* = 5.9727 \text{ mm/min (200 cm expandiendo círculo)}$$

$$v^* = 6.5697 \text{ mm/min (4 cm expandiendo círculo)}$$

$$v^* = 6.5757 \text{ mm/min (4 cm expandiendo círculo)}$$

$$v^* = 7.1727 \text{ mm/min (200 cm expandiendo círculo)} \text{ (Hill et al. 2003).}$$

3. Jardines Alquímicos. Creación asistida por computadoras químicas

En este capítulo abordaremos a profundidad la serie de obras creadas en este proyecto, los experimentos, técnicas compositivas, desarrollos conceptuales y herramientas tecnológicas involucradas en el proceso de creación.

3.1 Propuesta de implementación de computadoras químicas

Los chips fueron diseñados con el software de modelado 3D llamado Rhinoceros²⁸ y fabricadas por medio de la técnica de desbaste con máquina CNC sobre el material conocido como policarbonato sólido. Este material fue escogido por sus características: al menos 200 veces más resistente que el vidrio, es más ligero que el vidrio, alta transparencia y hasta 90% de transmisión de luz, protección contra rayos UV o IR, se puede modelar con termoformado, formado en frío y CNC, aislante eléctrico, acústico y térmico, resistente a la corrosión. Esto permite contener la reacción BZ, medios de cultivo para bacterias y soportan el protocolo de autoclave.

La propuesta se basa en la creación de pequeñas unidades geométricas que llamaremos primitivos. Éstas fueron diseñadas pensando en la facilidad en la que un flujo de información pudiera viajar por sus topologías. (fig. 28)

²⁸ <https://www.rhino3d.com/>

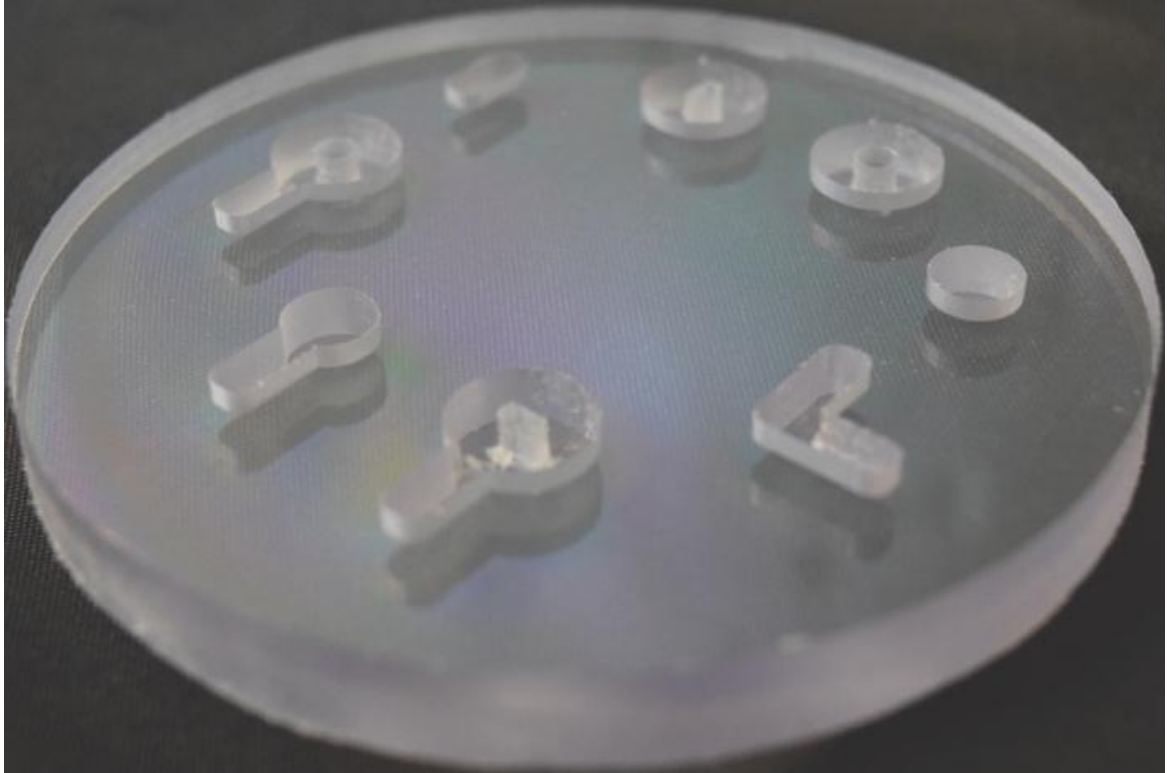


Fig. 28 Los 4 primitivos y 4 primeras permutaciones.

A continuación, se presentan los chips diseñados partiendo de estos primitivos, extendiendo las primeras 4 combinaciones. Salvo el último chip que intentaba ser un diseño menos funcionalista, con esto nos referimos a que el diseño de esta última no siguió la regla de añadir primitivos a una construcción con un propósito de cálculo definido, sino a una necesidad estética.



Fig. 29 Chip químico.

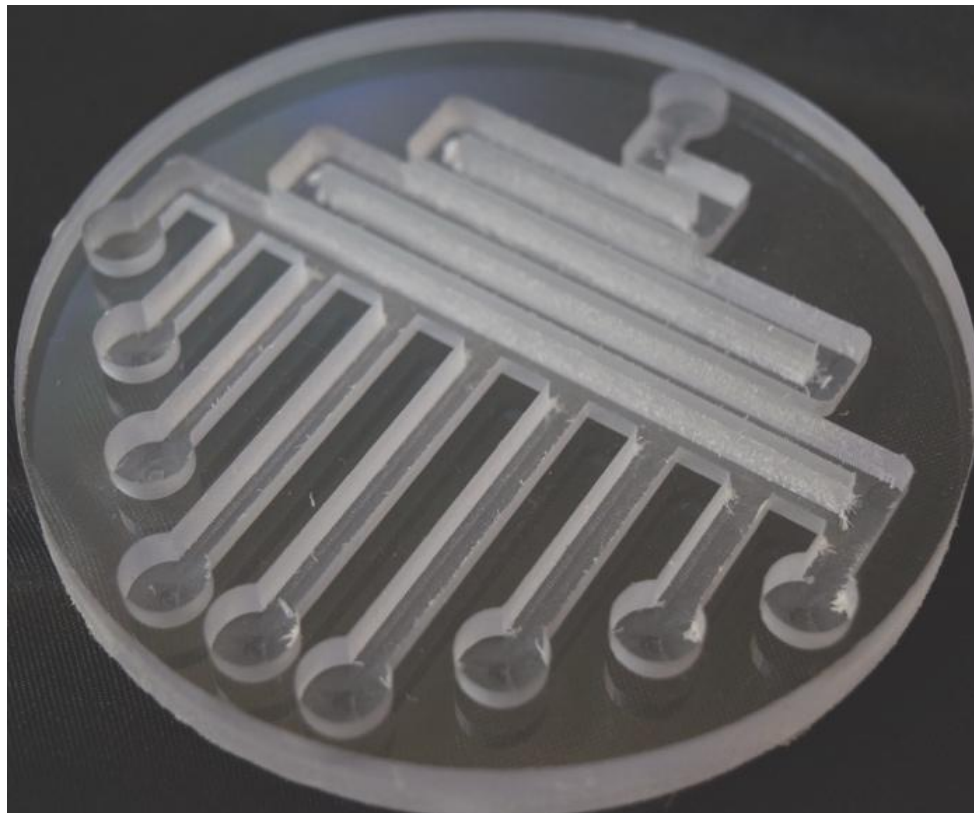


Fig. 30 Chip químico.

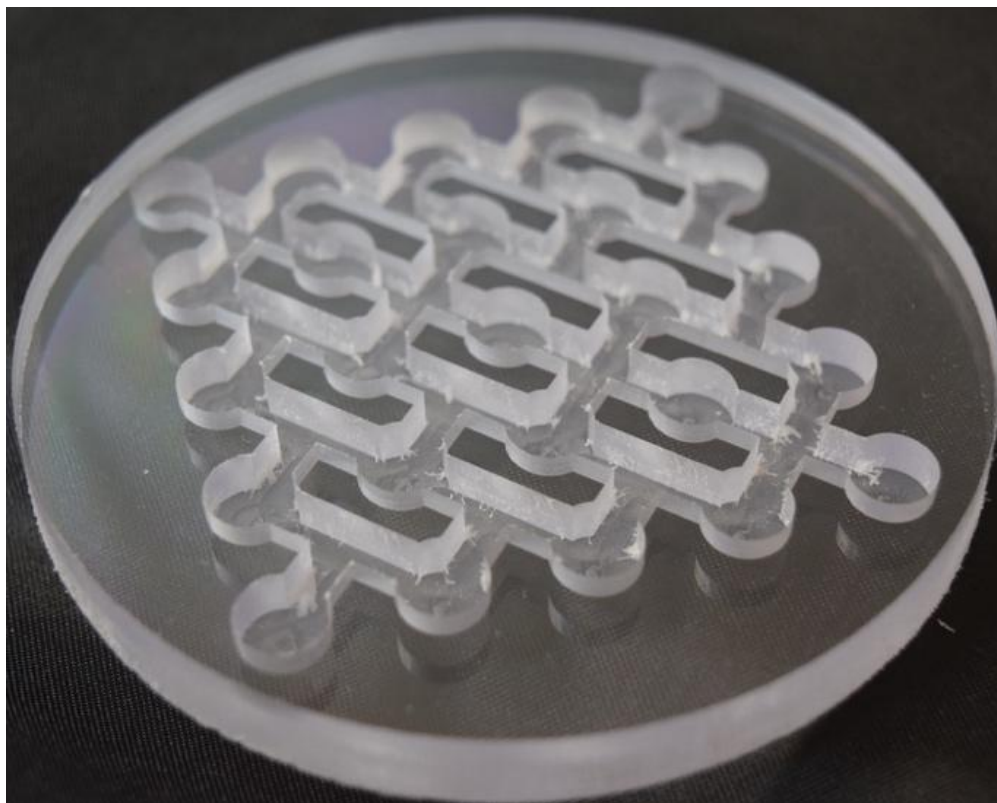


Fig. 31 Chip químico.

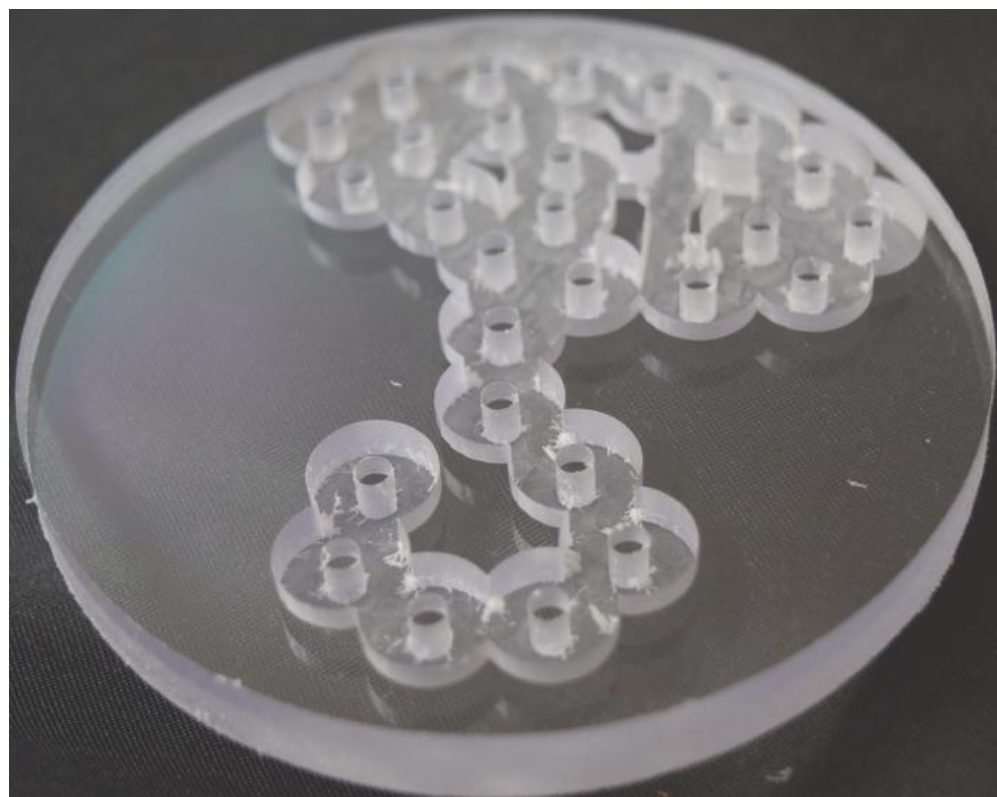


Fig. 32 Chip químico.

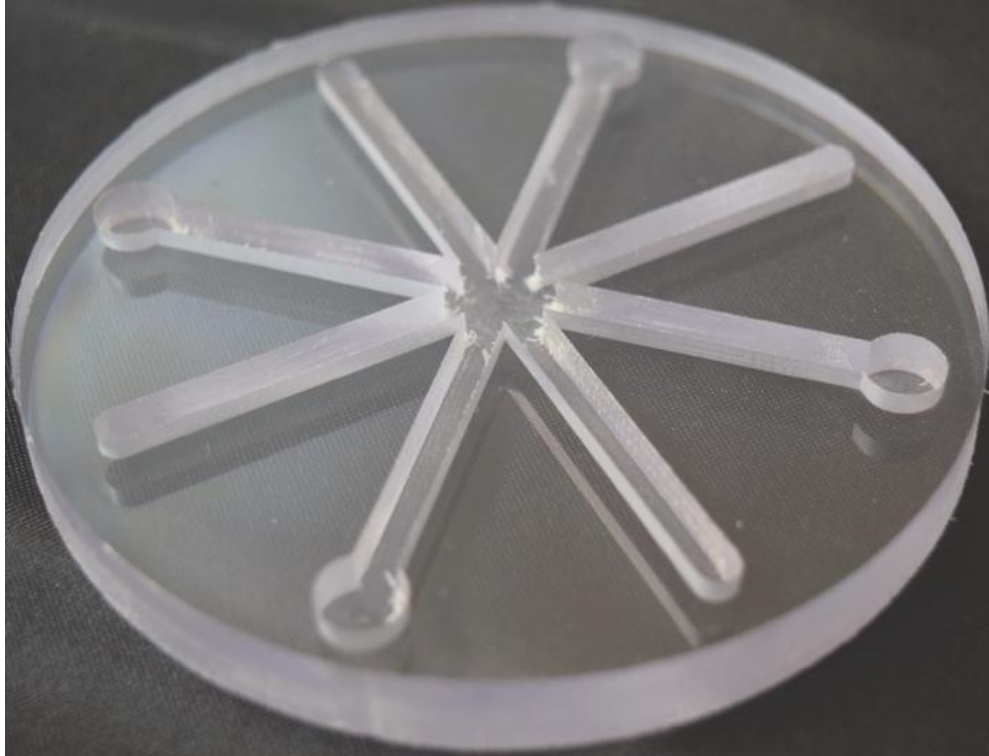


Fig. 33 Chip químico.

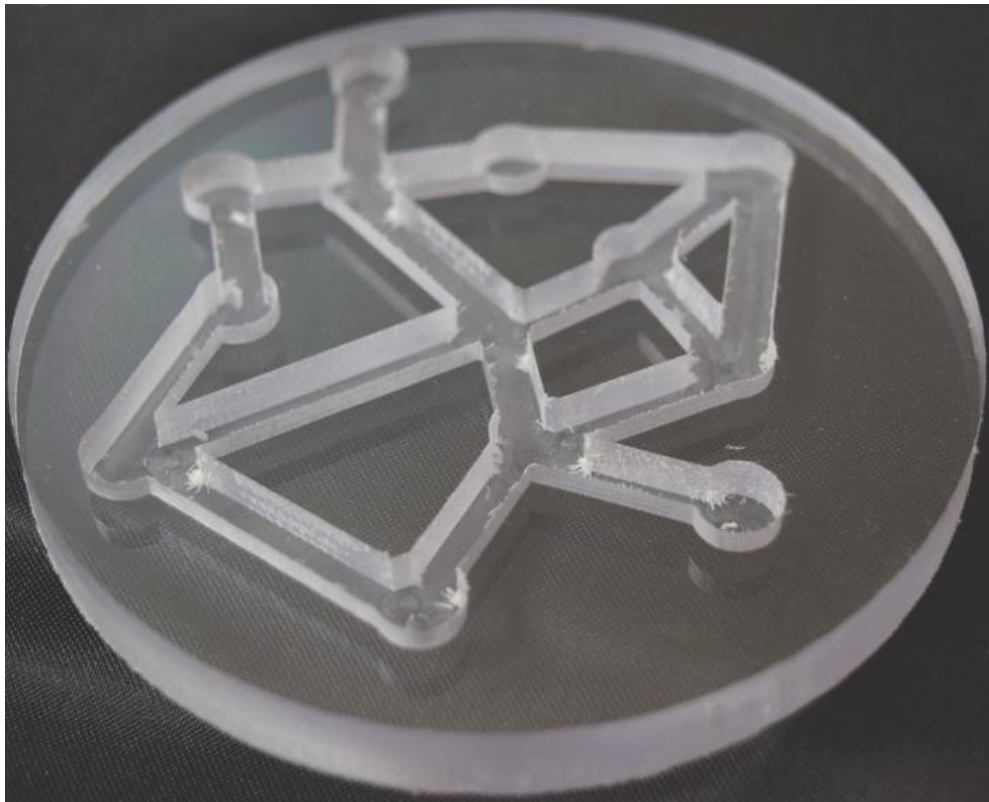


Fig. 34 Chip químico.

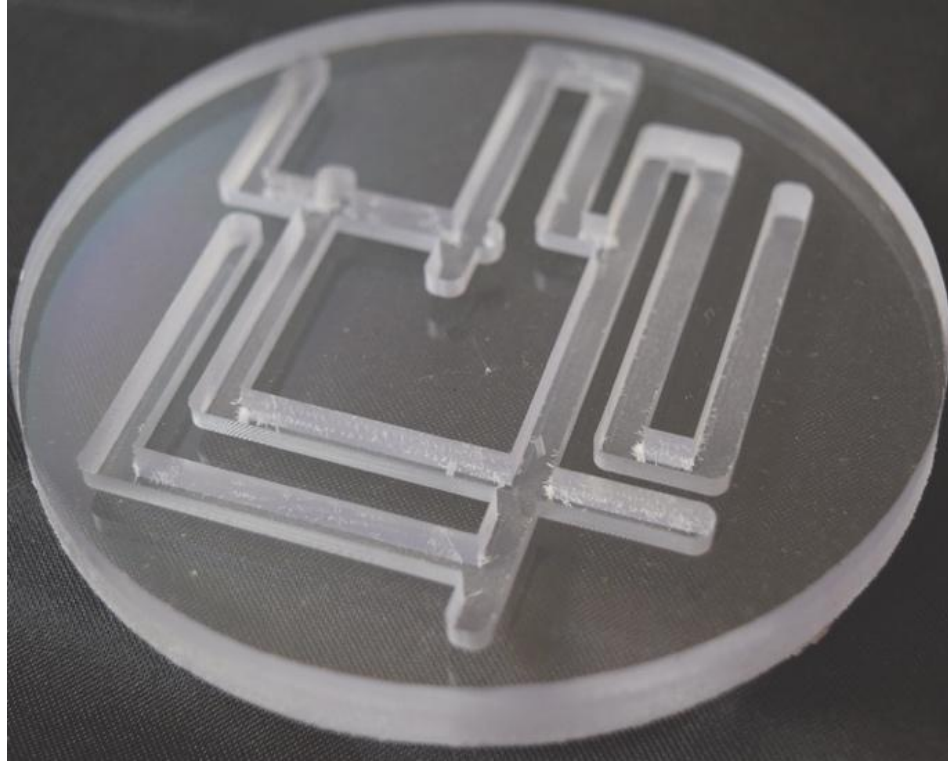


Fig. 35 Chip químico.

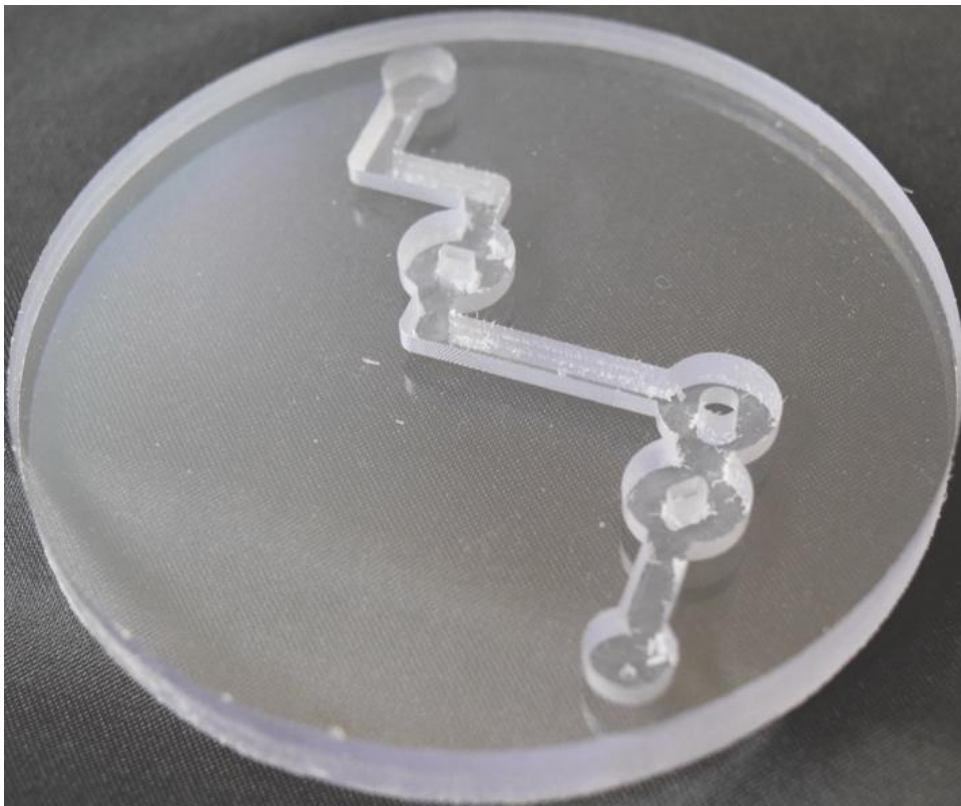


Fig. 36 Chip químico.

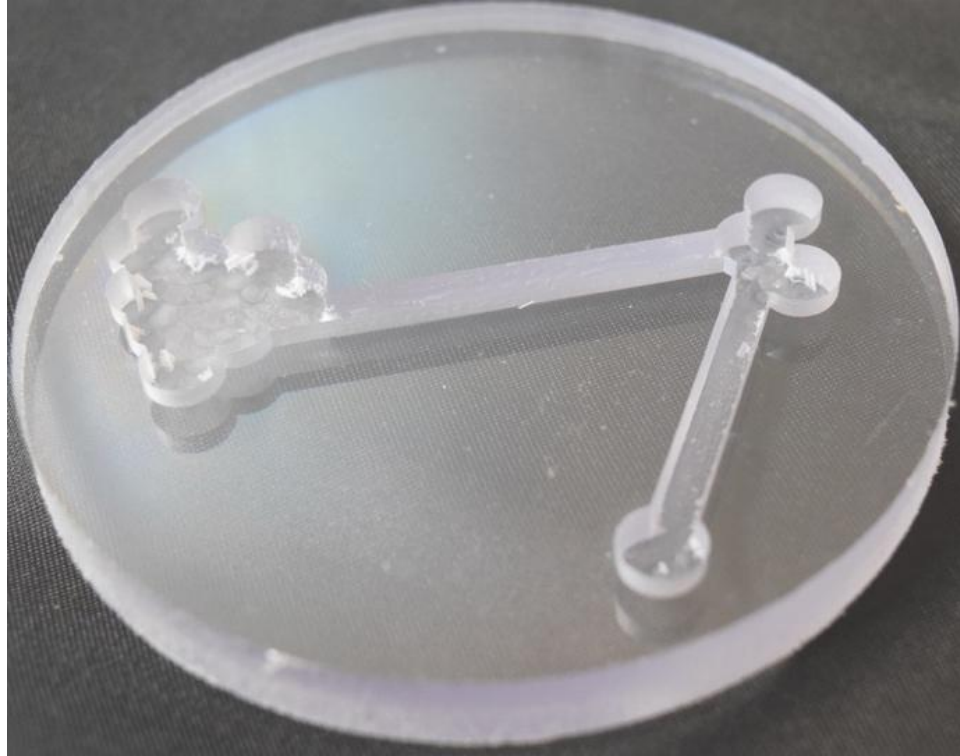


Fig. 37 Chip químico.

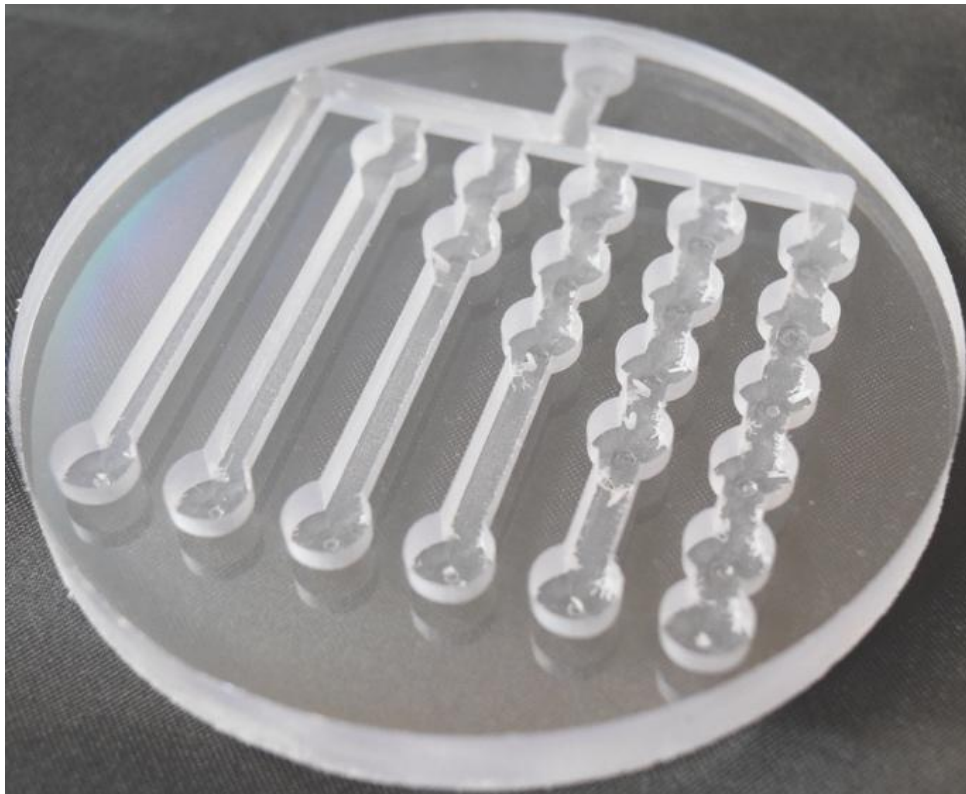


Fig. 38 Chip químico.



Fig. 39 Chip químico.

La lógica que siguen los diseños de los chips responde a dos factores importantes, el primero es diferentes tipos de ancho en el canal de comunicación entre los circuitos, la segunda es la conectividad entre cada uno de los nodos y la tercera es la cantidad de obstáculos que encuentra el frente de expansión de la onda y el tamaño crítico que tiene que tener para interrumpir su formación continua.

Los componentes rectos favorecen la formación de patrones continuos y no favorecen los vórtices durante las primeras etapas de oxidación. Los componentes circulares fomentan la formación de vórtices y si están conectados con varios componentes generan varios. Los componentes con obstáculos en medio quedan en medio si bien no favorecen la generación de vórtices, también rompen la continuidad de los frentes de expansión de onda, un poco parecido a lo que sucede con los rompeolas.

Este primer grupo de chips se puede ubicar entre las máquinas abstractas para programación paralela y máquinas abstractas de propósito específico. Las máquinas abstractas

“Los modelos paralelos y distribuidos convergen debido a las tendencias hacia las redes de alta velocidad, la independencia de la plataforma y los sistemas operativos basados en micro-kernel ... más notablemente, la Máquina Virtual Paralela PVM (1990) que sirve como una abstracción para programar conjuntos de computadoras heterogéneas como un solo recurso computacional. La máquina abstracta de subprocesos TAM (1993) y una máquina abstracta similar, pero más simple se han propuesto como arquitecturas de destino generales para subprocesos múltiples en máquinas altamente paralelas... Los lenguajes funcionales puros son referencialmente transparentes y la evaluación paralela de, por ejemplo, los argumentos de la invocación de una función parecerían una idea prometedora.” (Diehl, Hartel y Sestoft, 2000).

Las máquinas de propósito específico “Las máquinas abstractas no solo se utilizan para la traducción de lenguajes de programación, sino también como niveles intermedios de abstracción para otros fines. La reescritura de términos es un modelo de cálculo utilizado en diversas áreas de la informática, incluido el cálculo simbólico, la demostración automatizada de teoremas y la ejecución de especificaciones algebraicas.” (Diehlet al., 2000).

3.2 Sistema de captura

Para poder grabar la imagen con una cámara hizo falta un sistema de iluminación controlado que consistió en una pantalla de plasma, que podía tener una imagen blanca o con diferentes tonos de gris, esto para poder potenciar la luz coloreada que llegaba a la cámara a través de la reacción, una lámpara de luz fría direccionada a los chips y una luz, también fría, ambiental difundida en el espacio en general. Con esta iluminación no se depende de la luz del día ni sus características.

El registro fue tomado en full HD (1920x1080) con una cámara Canon EOS 80D en un formato mixto (jpg y nef), el formato nef puede permitir hacer una edición de color muy específica lo que puede permitir eliminar ruido en la captura y extracción de datos.

Para tener otra manera extra de favorecer los colores que llegan a la cámara, la pantalla sobre la que están los chips despliega una imagen generada algorítmicamente mediante la técnica de shaders desde el lenguaje de programación Processing²⁹. Que permiten hacer la misma cosa que una corrección de color sobre el archivo nef pero desde el origen. Con todas estas estrategias se puede tener control de iluminación y corrección de color preventivo y en postproducción de las tomas de video para su posterior análisis. (Fig. 40)



Fig. 40 Sistema de captura.

²⁹ <https://processing.org/>

3.3 Producción de obra sonora

Analizaremos 4 obras asistidas por las computadoras químicas, es decir, el oscilador interactuando con las geometrías de los chips.

3.3.1 JazzCodes VII: --.. ..-.-. --.

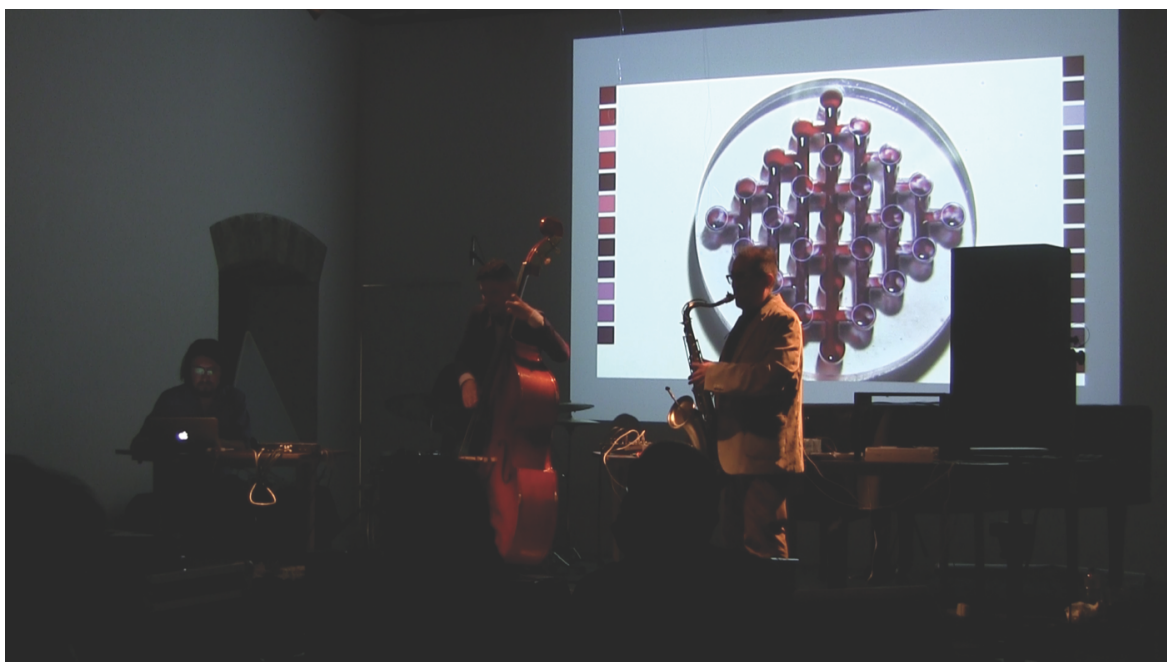


Fig. 41 estreno de la obra en el auditorio del Centro Mexicano para la Música y las Artes Sonoras en el contexto de la Conferencia Internacional de Live Coding 2017.

3.3.1.1 Descripción general de la obra

El proyecto de JazzCodes es un proyecto abierto que consiste en una serie de obras para cuarteto de jazz y *live coder*, es decir, una dotación de: batería, contrabajo, guitarra, saxofón o clarinete bajo y un intérprete de electrónica en tiempo real que utiliza la técnica de live coding para unirse al ensamble.

El live coding es una técnica de *live electronics* que consiste en interpretar una composición o improvisar utilizando códigos de programación y mostrándolos al público en tiempo real, en contraposición a la música electrónica de cinta o de soporte fijo, en donde se reproduce una grabación que acompaña a instrumentos acústicos.

Para este proyecto se creó una librería personalizada de programación para el lenguaje superCollider³⁰ que permite hacer *live coding from scratch*³¹, esto quiere decir que al comenzar la improvisación o la composición no hay ningún código escrito con anterioridad y el público puede ver desde 0 la creación de los instrumentos digitales y sus secuencias.

El sistema utilizado en esta obra consistió en controlar la librería desarrollada para esta obra de supercollider llamada *Jazzificacion.sc* con los datos producidos por el chip, en lugar de controlarla de manera manual como se venía haciendo en las versiones anteriores. El sonido directo de todos los instrumentistas entra en canales independientes de audio al sistema y son procesados con supercollider de diversas formas:

- Loop station: se graban 20 segundos del instrumento, después de esos 20 segundos se vuelve a grabar sobre ese archivo, pero bajándole el volumen a los primeros 20 segundos un 25%, creando así una masa sonora en capas.
- Pitch shift: se modifica la frecuencia del sonido directo, es decir, si el instrumento está tocando un do índice 5, el procesador devuelve una frecuencia diferente, por ejemplo, un do índice 6, o un sol índice 5, etc... también se puede afinar el proceso a frecuencias fuera de la afinación matemática de la escala temperada.

³⁰ <https://supercollider.github.io/>

³¹ Este es un estilo de live coding que se conoce en el mundo como *mexican style* o estilo mexicano que consiste en programar la improvisación o la composición abierta desde cero, esto quiere decir, sin ningún código preprogramado.

- Síntesis granular³²: se puede manipular el tamaño del grano y el número de granos por segundo de manera estocástica.
- Reverberación: se puede manipular el tamaño del espacio virtual, la atenuación y la mezcla entre sonido directo y sonido procesado.
- Espacialización: todos los procesos pueden tener una espacialización independiente en 4 y 8 canales, así como el sonido directo.

En total son 20 variables que se pueden controlar por cada uno de los instrumentos y cada una de las variables pueden ser de dos tipos, discreta y continua. Las variables discretas son las que pasan de un estado a otro sin hacer rampas de valores entre ellas, por ejemplo, prendido y apagado, no hay valores entre los dos estados, no se puede estar medio prendido o medio apagado. Las variables continuas, por el contrario, pueden tener valores intermedios que aporten a la expresividad musical, por ejemplo, la espacialización. También se puede secuenciar una variable continua de manera discreta, pero eso solo como estrategia de composición no quiere decir que exista como tercera categoría.

En las seis primeras obras de la serie se secuenciaron los cambios de valores de las variables de este sistema utilizando códigos de supercollider diseñados para esa función, por ejemplo, Pdef (Pattern definition), Tdef (Task definition) o secuenciadores Demand. Para la séptima versión se utilizó por primera vez un generador de datos que provenían de uno de los chips BZL, es decir, las

³² “Entre los diferentes métodos de síntesis de audio para la producción de sonidos que pueden tener algún tipo de significado musical existe una clase conocida como síntesis de audio por modelos dependientes del tiempo y frecuencia (t/w). De estos algunos están basados en el principio que relaciona estos dos componentes t/w a nivel cuántico de tal forma que cambios en la señal relacionados con el dominio del tiempo alteran el espectro del timbre de un sonido y viceversa. Los métodos que utilizan este principio para la manipulación y tratamiento de un sonido son conocidos como síntesis granular y granulación de sonidos digitales. Como resultado se obtienen altas densidades de cuanta acústica que se puede denominar como “granos”. Estos granos se producen a partir de formas de onda y envolventes con una duración menor a 50ms. Al repetir varios granos en una sucesión a una tasa mayor a 20Hz., los granos se funden produciendo un sonido continuo. Es así como cada grano del tipo “granos de Gabor” posee una forma de onda independiente de la duración del grano (Síntesis Granular) mientras que en la granulación de audio se utiliza un modelo del tipo análisis/resíntesis con un método matemático conocido como “onditas” o “wavelets” y en el cual se mantiene una relación inversa entre la frecuencia y duración.” (Prieto y Reyes sf.)

computadoras químicas descritas en esta tesis. De tal manera que la participación del intérprete de electrónica consistió en dirigir los flujos de datos del chip a las diferentes variables del sistema de procesamiento e interconectar sus perfiles numéricos con el resto de los materiales sonoros, una nueva especie de dj, pero no un *disc jockey*, sino un *data jockey*.

3.3.1.2 Red neuronal no lineal de sustrato químico

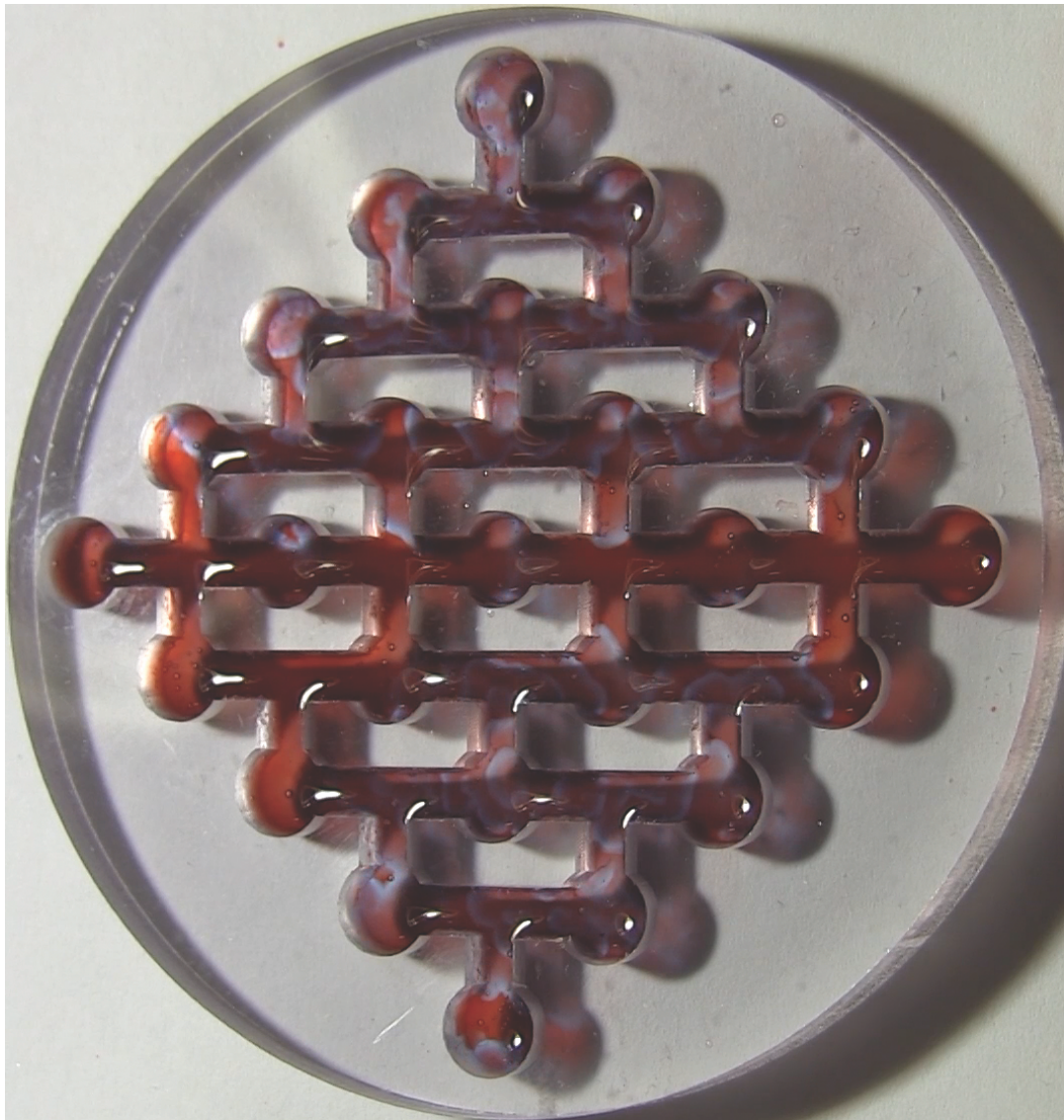


Fig. 42 Implementación de una red neuronal química.

El chip utilizado para esta obra es una implementación de una red neuronal con características particulares de este paradigma de cómputo. Se puede observar un registro en video en el siguiente link <https://vimeo.com/263939095>.

Para este diseño se utilizaron solo 2 primitivos, el distribuidor (dis) y el vortizador (vor). Este diseño cuenta con 25 vortizadores (Fig. 43) y 32 distribuidores (Fig. 44). En la forma que están interconectados forman 81 puntos de contacto (Fig. 45), de 2 tipos, distribuidor↔ distribuidor y distribuidor↔ vortizador. Estos puntos de contacto forman 41 nodos (nod) (Fig. 46) que tienen 4 niveles de complejidad por el número de puntos de contacto que los conforman. Estos números fueron escogidos para romper cualquier eje de simetría con la escala por tonos relacionada con afinación temperada europea.

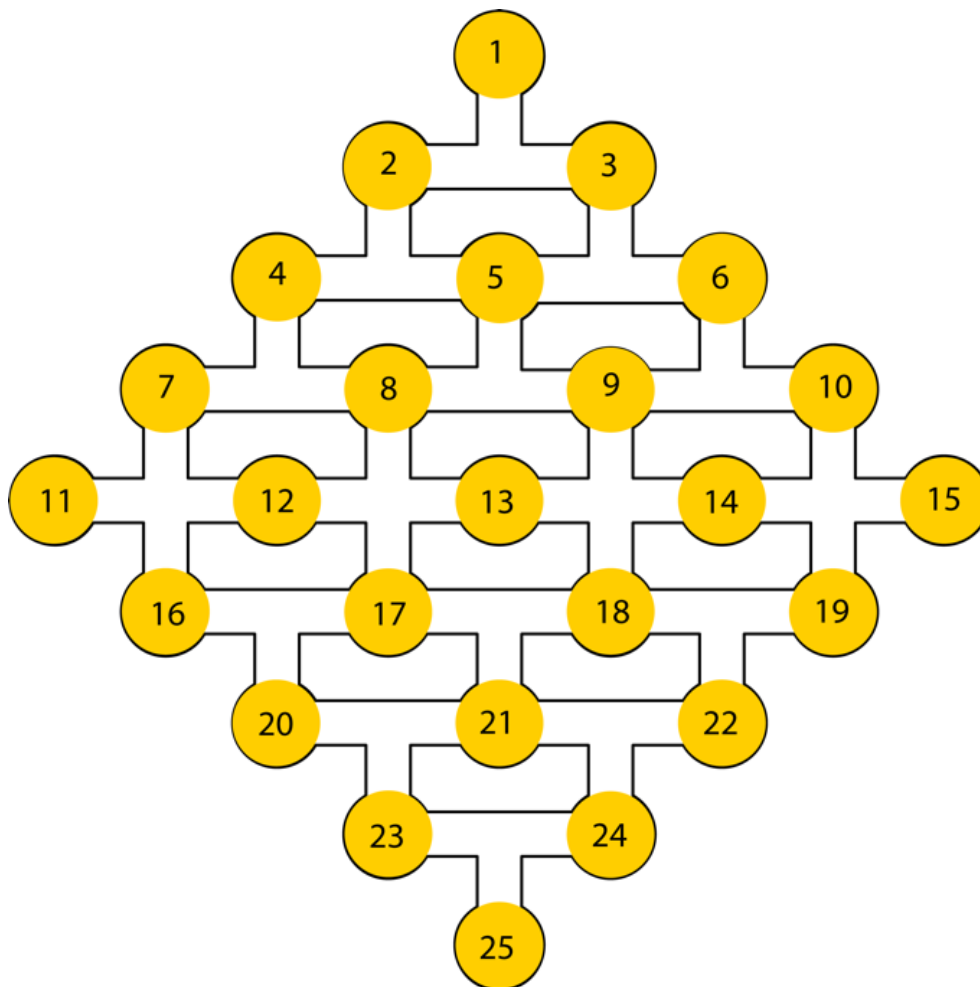


Fig. 43 Vortex atractores

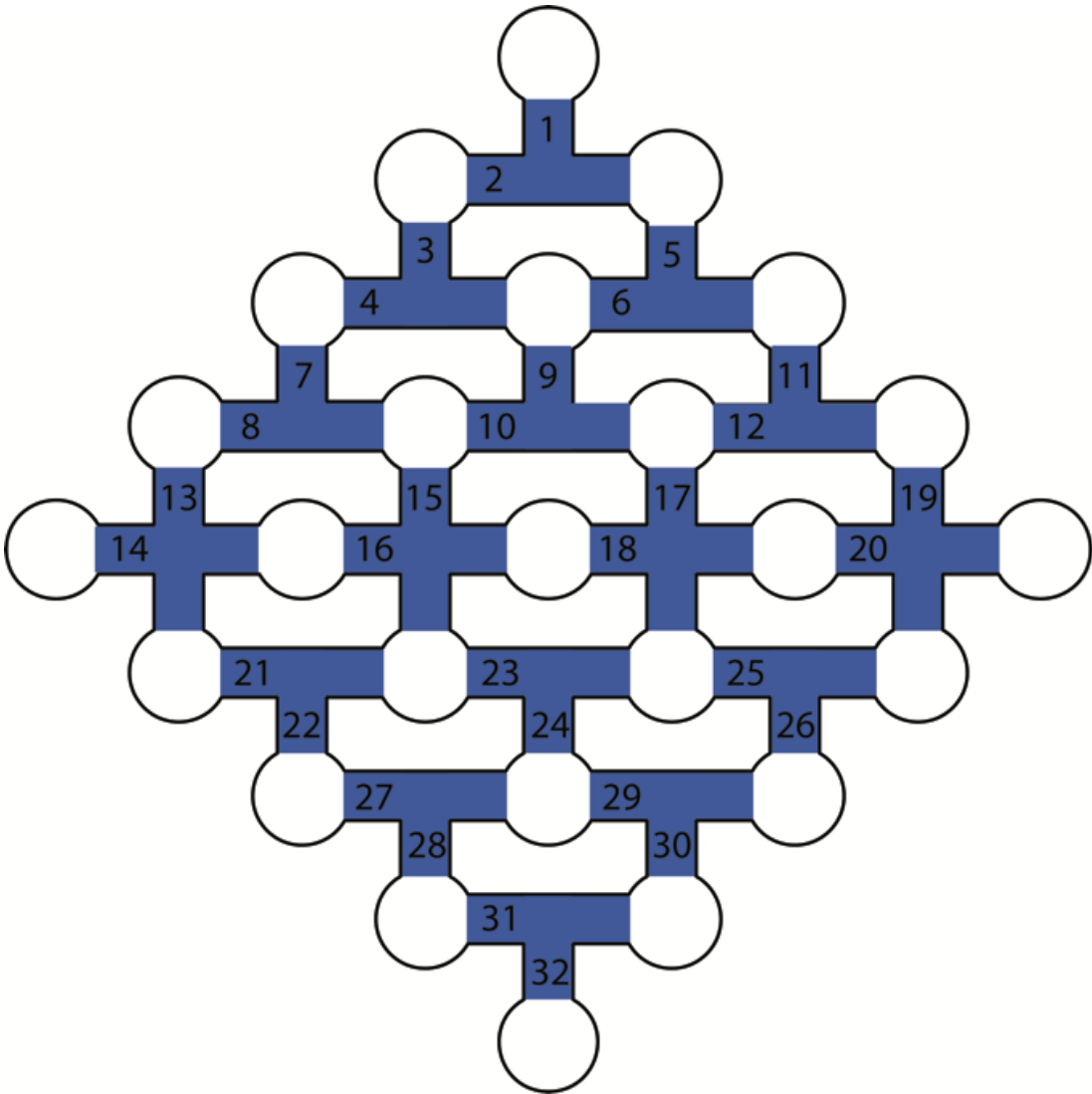


Fig. 44 Distribuidores

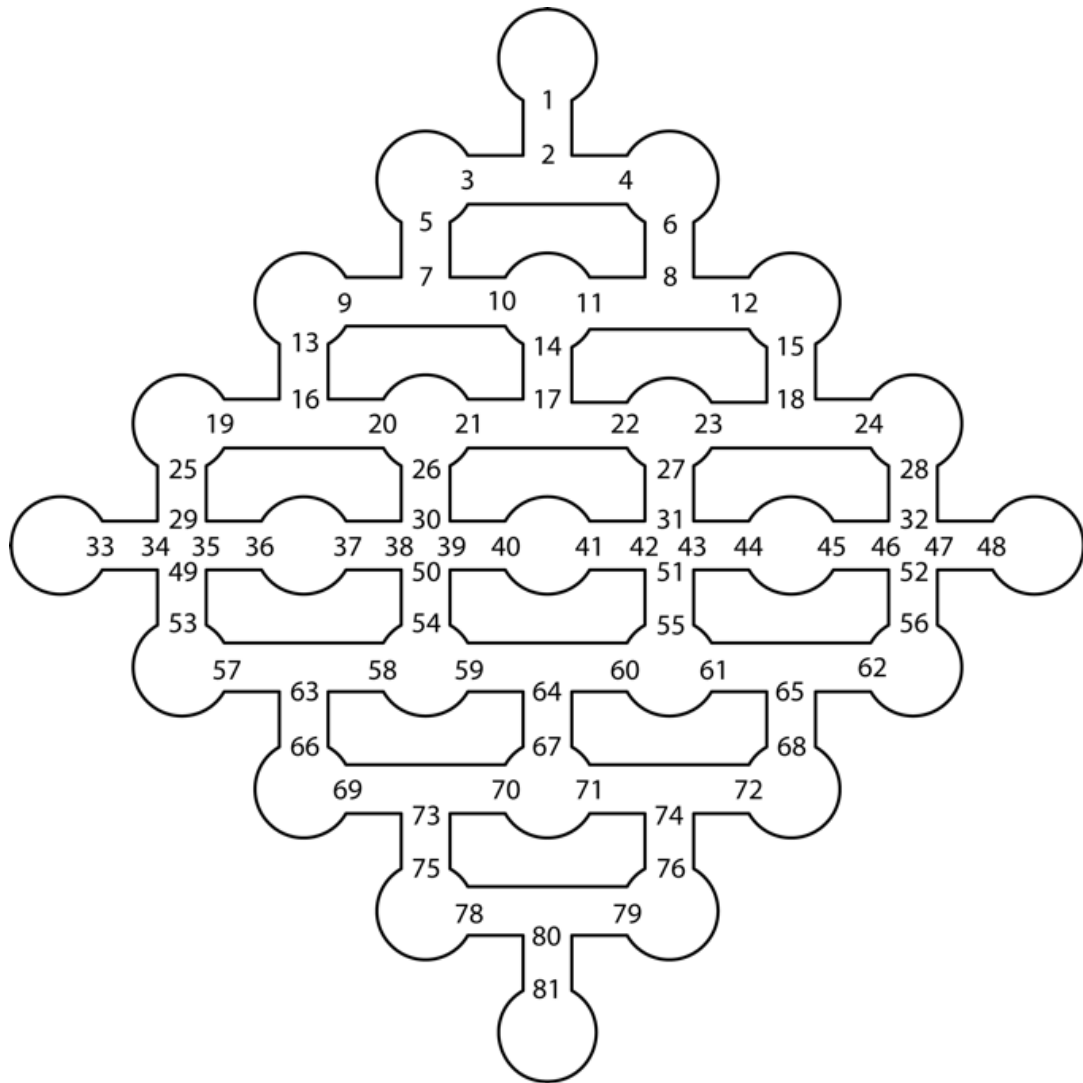


Fig. 45 Puntos de contacto

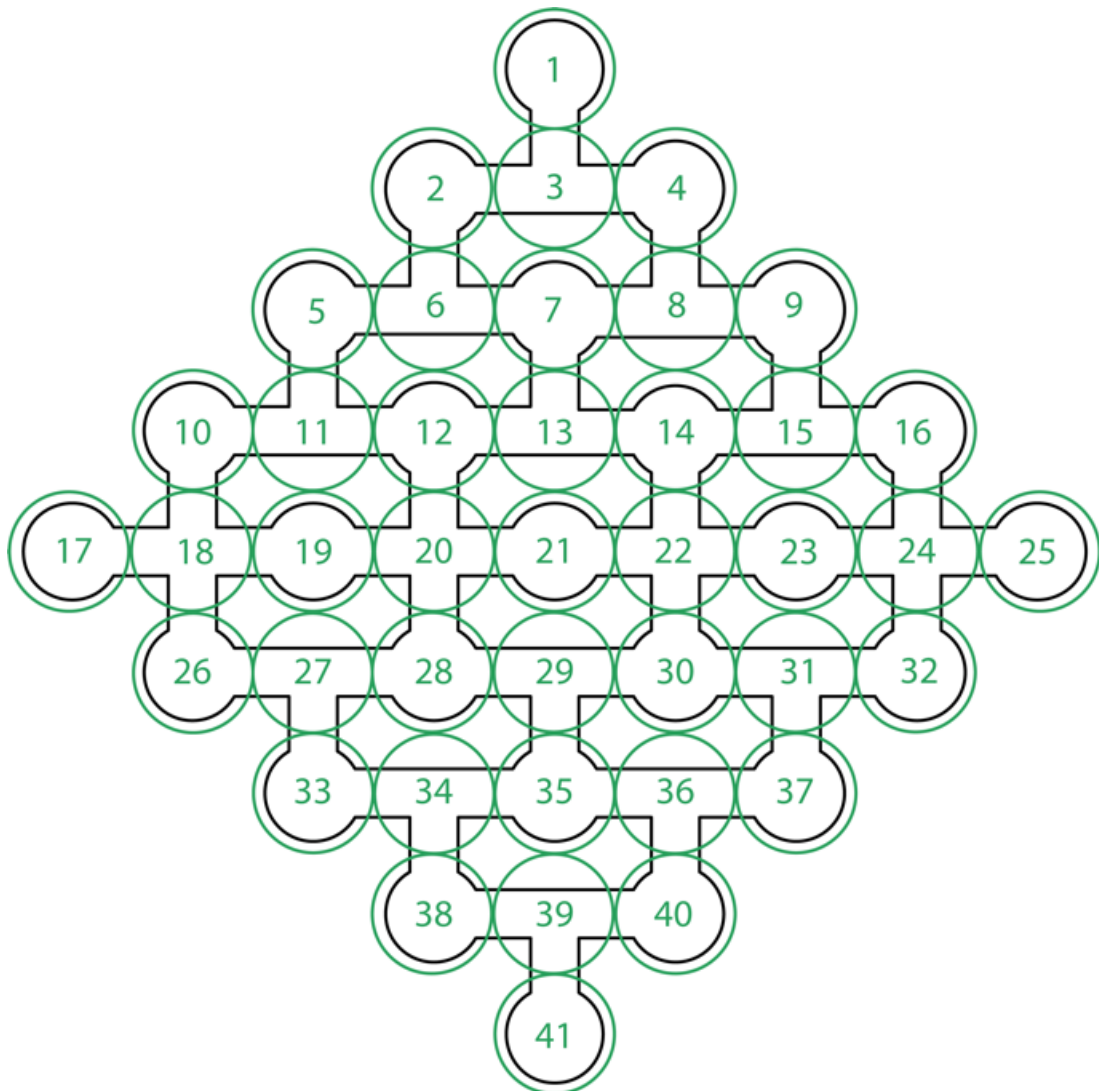


Fig. 46 Nodos

Estas combinaciones de elementos y su interconexión favorecen ciertos comportamientos del oscilador. Si bien cada una de las activaciones tiene particularidades específicas, hay algunos comportamientos que emergen con la geometría de este chip, por ejemplo, conforme se va oxidando la reacción, el área roja de la va disminuyendo dando paso a el color morado, esto permite que al final los frentes de expansión tengan poco espacio para viajar y se generen vórtices. Al comienzo de la reacción se puede ver con más claridad cómo es que el chip influye en las geometrías del oscilador.

En nod1 inicia el primer frente de todo el oscilador; podemos ver como dis1 ayuda a que éste recorra su camino sin colisionar ni generar otros frentes perpendiculares hasta que la forma del vor 1 genera el primer vórtice estacionario. (Fig. 47)

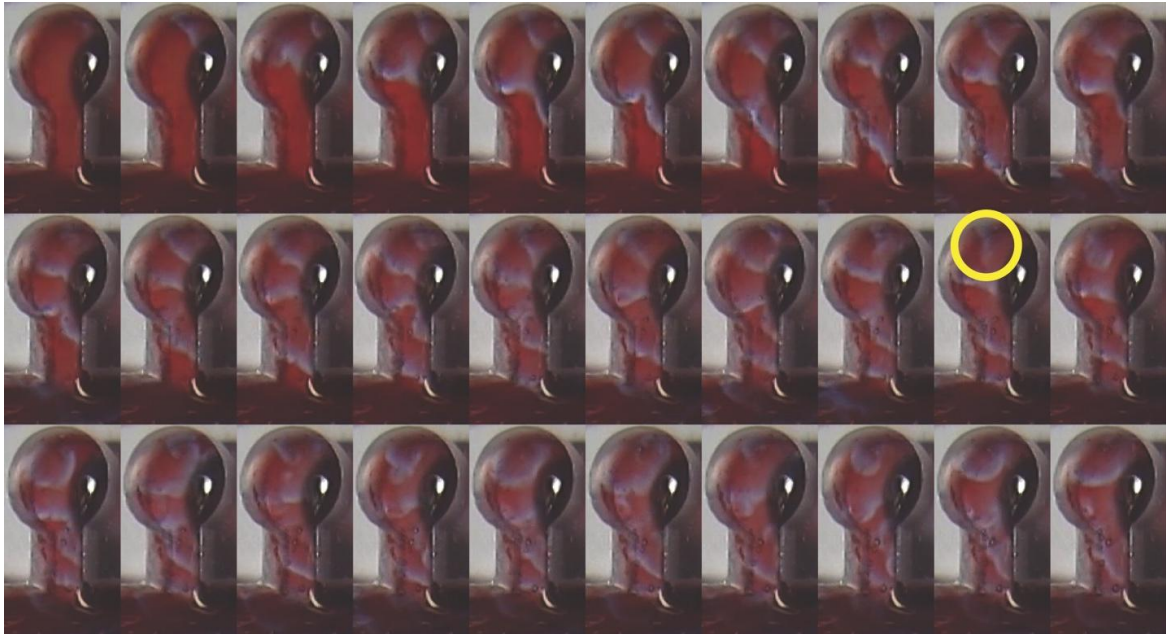


Fig. 47 nod1 y nod 2 Análisis. La secuencia de esta imagen va de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

¿Por qué son importantes estos dos comportamientos del oscilador? Como ya hemos visto antes, en la descripción de los tres paradigmas de cómputo que se desarrollan con el oscilador BZ, la arquitectura de esta computadora está íntimamente ligada con la frecuencia, los vectores y posiciones de las colisiones de los frentes de expansión de oxidación, por lo que poder encauzar el flujo de estos frentes nos permite conducir la información a diferentes estados, y los vórtices estacionarios representan obstáculos que frenan o encausan la información.

En el siguiente ejemplo podemos apreciar nod33 a nod37, en donde podemos observar que el nod35 es el punto de generación de frentes de expansión y los dis27 y 29 ayudan a que esa información llegue a los nodos circundantes sin encontrarse con vórtices estacionarios. (Fig. 48)



Fig. 48 nod33 a nod37 análisis. La secuencia de esta imagen va de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

El siguiente ejemplo es un nodo de conexión que tiene 4 conexiones, el nod22 conecta a nod14, nod21, nod23 y 30. En este ejemplo podemos ver como ocurren varias colisiones en el nod22 y a pesar de toda esa información no se forman vórtices estacionarios. Los vórtices estacionarios se forman con más facilidad en los nodos vor. (Fig. 49)

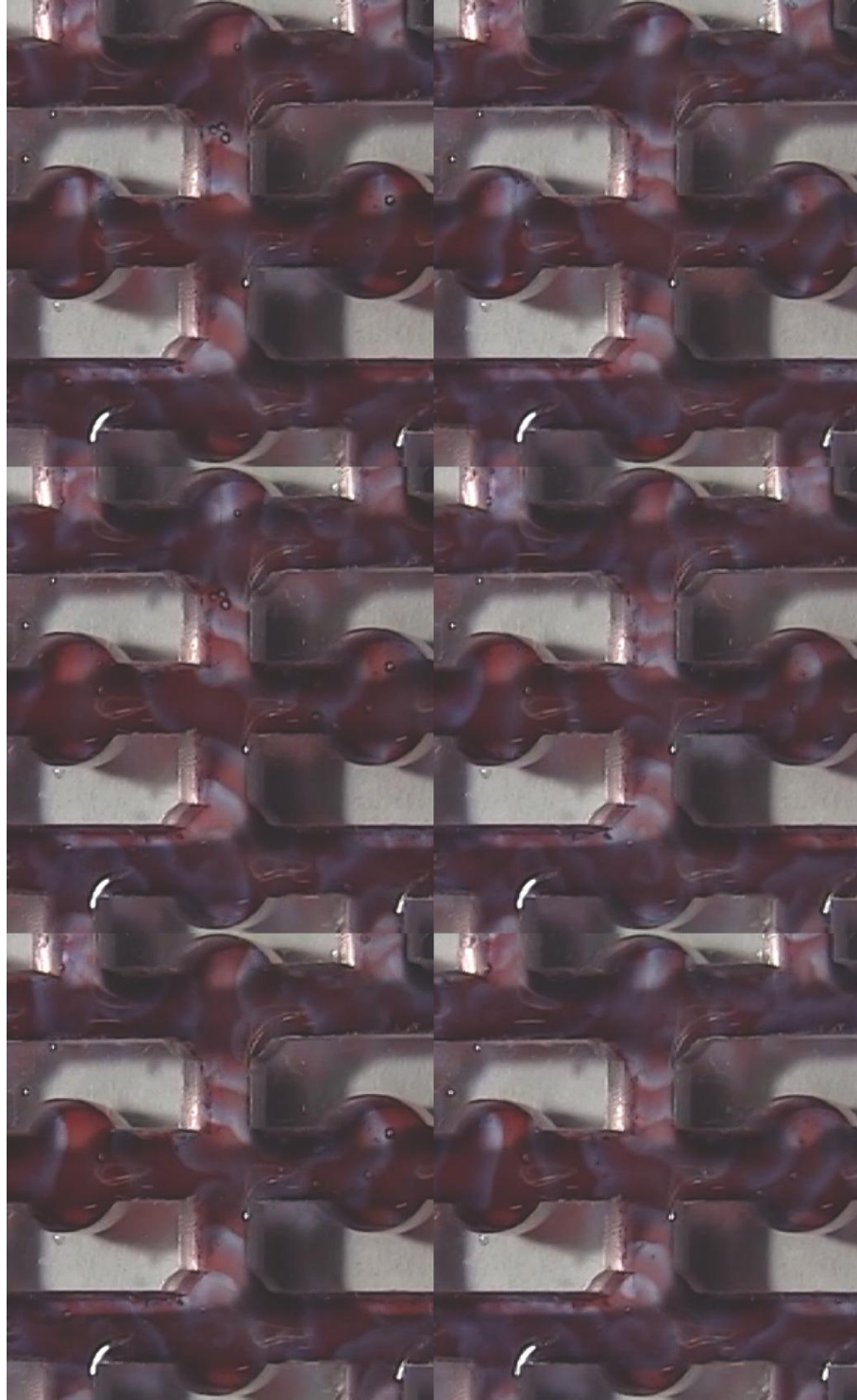


Fig. 49 nod22 con complejidad 4, conectado a nod14, nod21, nod23 y nod30. La secuencia de esta imagen va de arriba abajo y de izquierda a derecha.

3.3.1.3 Extracción y análisis de datos

En el apartado anterior se describió de manera verbal y esquemática la implementación de una red neuronal química con el lenguaje de programación para chips BZL. En este apartado describiremos la manera en que fueron extraídos los datos generados por estos chips, cómo fueron analizados y cómo fueron canalizados a la plataforma de procesamiento y composición en tiempo real utilizada en esta pieza.

Desde sus etapas de investigación más temprana el oscilador BZ fue estudiado por los científicos desde dos perspectivas importantes, la perspectiva teórica y la perspectiva operativa. La teórica se basó en modelos matemáticos, es decir, sistemas de ecuaciones no lineales que podrían describir el fenómeno químico. Por otro lado, la perspectiva operacional fue medida en gran mayoría con sensores de pH. Para la utilización de los chips BZL como controladores multimedia la extracción de datos por medio de sensores de pH era incosteable por la cantidad de recursos de innovación tecnológica que se requerirían, sin embargo, el diseño y fabricación de la implementación de un multiarreglo de electrodos (o MEA por sus siglas en inglés MultiElectrode Array) se plantea como una etapa futura del proyecto.

La tecnología utilizada para la extracción de datos, su análisis y su conexión al procesador de audio fue la visión computarizada. La visión computarizada es una rama de la inteligencia artificial que nos permite dotar a nuestros sistemas de ciertas funciones de alto nivel en la interpretación de imágenes, en el caso de este experimento aprovechamos el cambio de color que permite la ferroína en la reacción para mapear los cambios de pH y seguir la pista del nivel de oxidación de la reacción.

Para este experimento se utilizó el análisis de color de dos diferentes maneras, se explica el algoritmo a continuación.

Oscilación singular de magnitud (sub-umbral).

- Esta primera estrategia consistió en medir la distancia euclidiana entre el color de inicio (rojizo) y el color de oxidación (violeta). Analicemos a detalle el caso del vor1.
- Se tomó un pixel que fuera relevante para el análisis en cuestión de color, que en este caso fue el pixel con coordenadas (x:561, y:50) (Fig. 50).

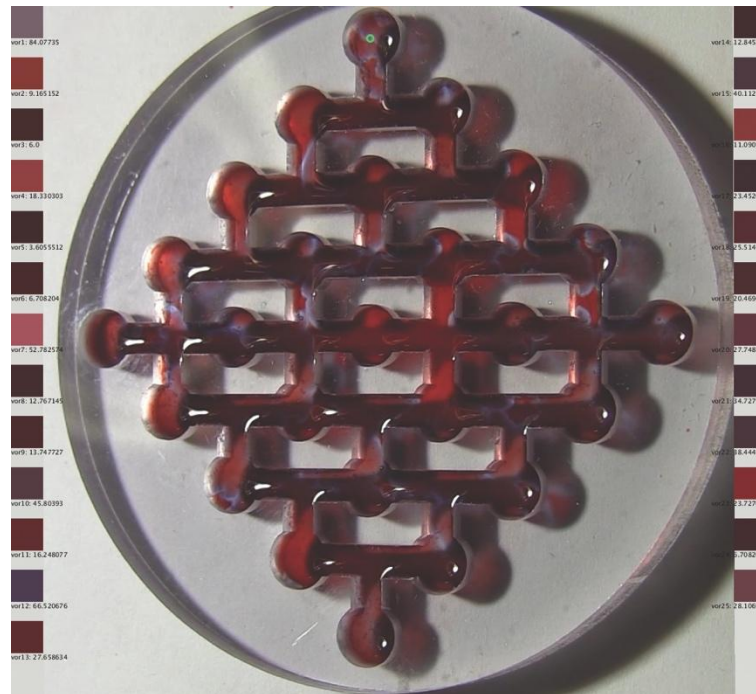


Fig. 50 en el círculo verde tenemos señalado el pixel analizado.

- Extraemos los datos de color del primer cuadro del video en formato RGB (rojo, verde y azul por sus siglas en inglés). El rango numérico posible es de 0 para nada de presencia de un color y 255 para el máximo de presencia. Los valores iniciales en ese pixel fueron (r:120, g:41, b:38).
- El espacio de color es un sistema de tres dimensiones y los conjuntos de color se pueden tomar como coordenadas, por lo que, mediante la fórmula de distancia euclidiana se comparó la primera toma de color con el valor de cada uno de los cuadros del video. De esta manera calculamos la magnitud de oxidación de la reacción (Fig. 51).

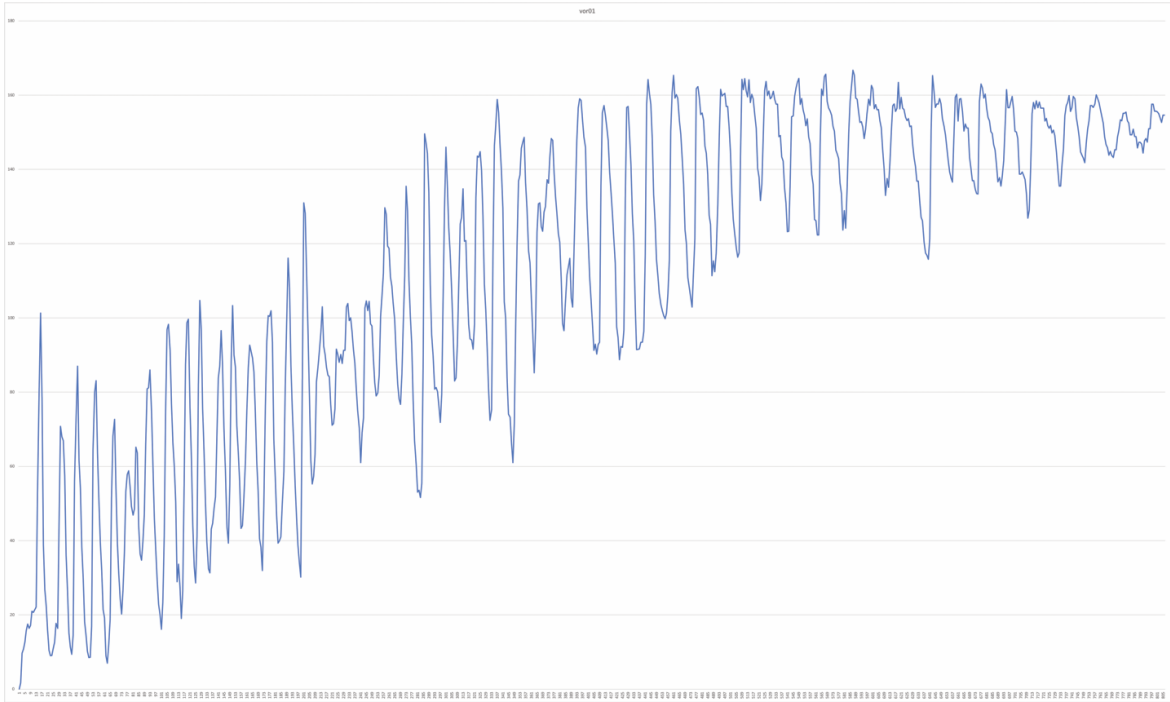


Fig. 51 oscilación singular de magnitud vor01

- En la interfaz del algoritmo de visión computarizada se puede visualizar en tiempo real el color del pixel y la magnitud (Fig. 52).

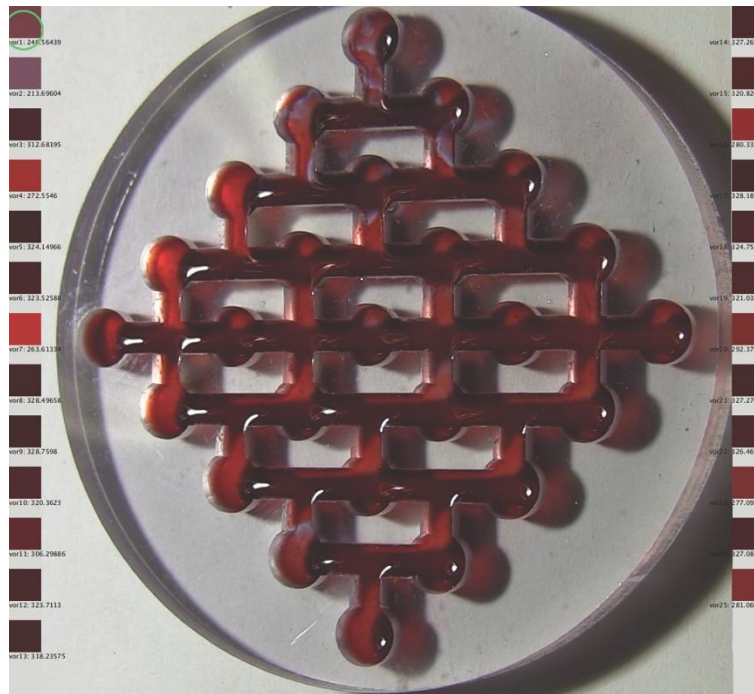


Fig. 52 en verde se indica el visualizador de vor01

Promedio zonal de magnitud (potencial de acción).

- Esta segunda estrategia consiste en promediar el color de una zona determinada y generar gestos discretos de activado/desactivado.
- Se toma un área de 40x40 píxeles (1600 píxeles) en donde el píxel de la oscilación singular de magnitud es el centro. En el caso de vor01, fueron de 541 a 581 en el eje de las abscisas y de 30 a 70 en el eje de las ordenadas.
- Se guarda en la memoria de procesos el color de los 1600 píxeles en el primer cuadro del video.
- Se compara ese primer color con el de cada uno de los cuadros para determinar su distancia euclidiana.
- Se suman todos los valores de las magnitudes.
- Se normaliza el promedio.
- Se escoge un peso y sensibilidad de reacción para cada uno de los potenciales de acción.
- En la interfaz del algoritmo de visión computarizada se puede visualizar en tiempo real si el potencial de acción está activado o en reposo a través de un círculo que rodea el área analizada (Fig. 53)

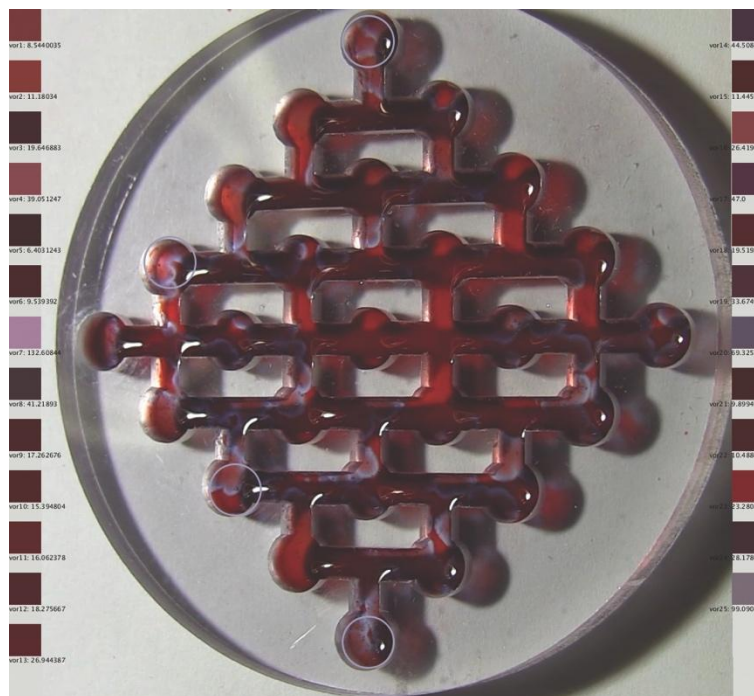


Fig. 53 los potenciales de acción prendidos en esta figura son vor01, vor07, vor20 y vor25. Lo podemos saber porque hay círculos violeta alrededor de ellos.

- El peso y sensibilidad de cada una de las neuronas de este sistema puede ser definido de manera independiente, lo que le da mucha robustez al sistema en cuestión de complejidad y variabilidad, es decir, el número de resultados en conjunto es muy variado, lo cual permite aprovechar todo el potencial no lineal del chip o cerrarlo a resultados muy específicos (aunque esto no lo convertirá en una máquina determinista nunca). Para variar la sensibilidad de cada neurona el algoritmo cuenta con una variable de umbral que puede ser fijada como condición previa a iniciar el chip, así como cambiar libremente en cualquier momento. Esta variable se compara con el promedio normalizado de la zona, y si es mayor a ese número se activa. Ya que el promedio está normalizado este valor puede ser 0, lo cual lo hace totalmente sensible y prende el potencial de acción todo el tiempo, o puede ser mayor a 1, lo cual lo inhabilita por completo y no se prenderá durante la activación del chip. En cuanto a los pesos de cada una de las neuronas hay dos estrategias para configurarlos, la primera es a través del software de visión computarizada. El área a analizar puede cambiar, el máximo es de 40x40 píxeles y el mínimo de 5x5 píxeles, lo que permite incorporar de mayor o menor manera el movimiento dentro de cada una de las neuronas, este valor puede ser fijado como condición previa y también cambiar conforme el chip está en proceso. La segunda estrategia es química. Como se puede observar en el registro de video del chip, pasan algunos segundos antes de que el primer frente de propagación de onda aparezca en el chip, y después comienzan a aparecer en diferentes lugares, esto le da gran varianza a los resultados que pueden generarse dentro de la construcción geométrica de este chip. Esto quiere decir que cada vez que sea echado a andar tendrán preponderancia algunas neuronas y otras no tanto, los pesos se auto configurarían como una propiedad emergente de este sistema no lineal. Pero también es posible generar puntos iniciales de propagación debido a la naturaleza química de la ferroína, ya sea con un láser (debido a que es fotosensible) o al contacto con un alambre de plata (Fig. 54). Al iniciar intencionalmente el oscilador habrá más pesos en la neurona o neuronas

seleccionadas y en las neuronas circundantes hasta llegar al punto crítico del oscilador alrededor del 75% del tiempo en donde los frentes se encuentran en todas partes debido al nivel de oxidación.

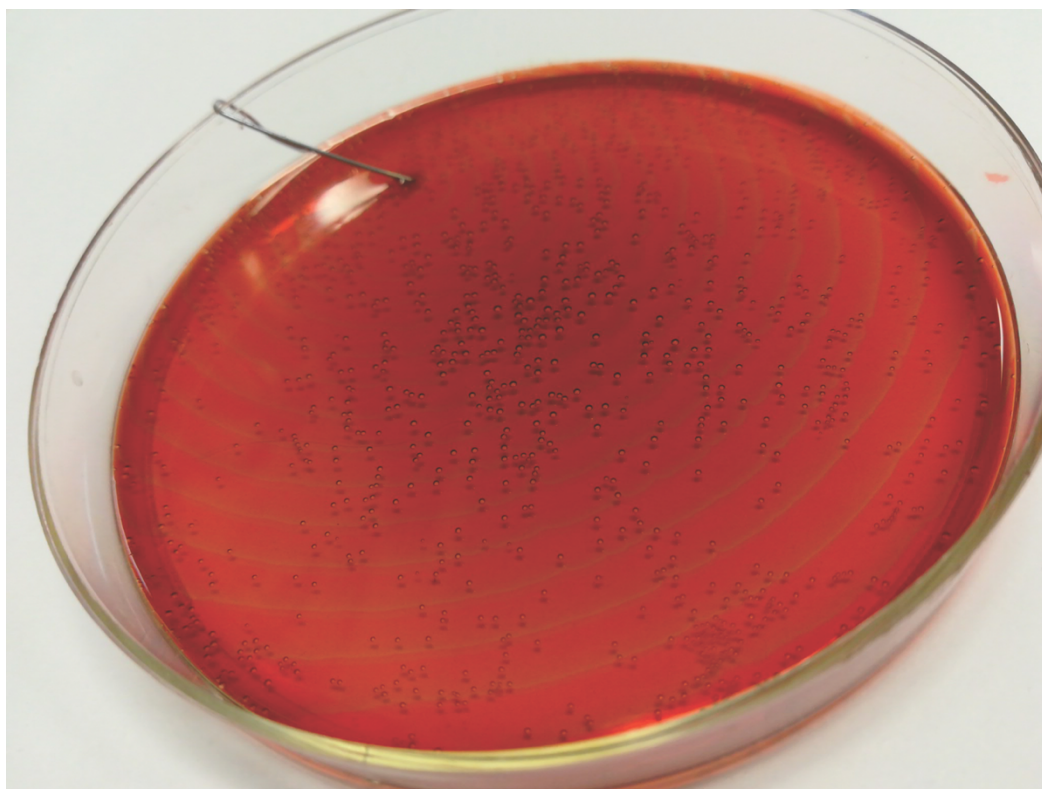


Fig. 54 Oscilador activado desde un punto focalizado.

3.3.1.4 Organización formal de la obra

El proyecto *Jazz Codes* fue desarrollado gracias al Programa de Fortalecimiento para Jóvenes Compositores “Prácticas de Vuelo” del Centro Mexicano para la Música y las Artes Sonoras. La convocatoria planteaba el desarrollo de una obra para cuarteto de jazz y electrónica, ya fuera soporte fijo o electrónica en vivo. La propuesta que se presentó a la convocatoria agregaba un intérprete al cuarteto de jazz, que era un *live-coder*, un intérprete que toca con una laptop a través de un lenguaje de programación, que en este caso era supercollider. Dada la naturaleza del live coding el proyecto propuesto contemplaba no generar una obra fija con una partitura, sino una serie de obras que propiciaran la improvisación dirigida, la composición en tiempo real y las formas abiertas.

Los intérpretes no reciben ninguna indicación hasta el día de la presentación y estas indicaciones incluyen gestos sonoros, entrada de los instrumentos y partes formales generales, agógica, salidas y cambios son dirigidos en tiempo real por el compositor de manera gestual. Para esta séptima versión los intérpretes recibieron un motivo sonoro obtenido del mazateco silbado, una lengua de la sierra mazateca ubicada en el norte del estado de Oaxaca³³. La frase es una pregunta que significa “¿Me esperan un rato más? ¿qué hacen ustedes?” que adaptado medianamente al sistema occidental de notación musical se ve de la siguiente manera (Fig. 55).

³³ “El mazateco forma parte de la extensa familia lingüística otomangue, perteneciente a su vez del grupo popoloca-mazateco, junto con el ixcatéco, chocho y popoloca. Fernández de Miranda (1951) manifiesta que el mazateco difiere en gran medida con respecto a las otras lenguas de esta (sub)familia, ya que hubo una ramificación anterior entre el Proto-Popoloca y el Proto- Mazateco, resultando de la primera el ixcatéco, chocho y popoloca y de la segunda una serie de variantes o lenguas mazatecas. El INALI en el Catálogo de lenguas indígenas Nacionales (2008) proyecta al mazateco como un conjunto lingüístico de dieciséis variantes, y de acuerdo a su clasificación, es posible considerar algunas de sus variantes dentro de la categoría de lenguas por las siguientes razones: a). En razón a que presentan diferencias estructurales (tonales, morfológicas y léxicas). b). Tomando en cuenta su propia identidad sociolingüística, varias comunidades mazatecas se consideran como una lengua diferente y no como una misma lengua. De acuerdo a la ubicación geográfica la gran mayoría de los pueblos mazatecos se encuentran en la región conocida como región mazateca ubicada en el norte del estado de Oaxaca, otros en el sur de Puebla y el este de Veracruz. En lo que respecta al estado de Oaxaca, esta extensa región se encuentra dividida geográficamente en dos zonas, la parte alta que corresponde a la zona fría (Nangi Nyààn) perteneciente a la cadena montañosa de la Sierra Madre Oriental, de donde se deriva la parte alta de la Región Cañada y Sierra Negra de Puebla; mientras que la parte baja (Papaloapan) se caracteriza por tener un clima tropical-húmedo, derivándose el nombre de Tierra Caliente (Nangi Sjëè), región autodenominada por los propios hablantes mazatecos para referirse a los mazatecos que viven en dicha región.” (García, 2013). “George Cowan desde 1943 llevó a cabo investigaciones lingüísticas del idioma mazateco en los alrededores de Huautla de Jiménez. Este autor fue el primero en señalar la existencia de lenguaje silbado entre los mazatecos. Los ejemplos presentados en "Mazateco whistle speech" demuestran la importancia del tono en la lengua mazateca, el cual permite que la conversación pueda llevarse a cabo sin la necesidad de segmentos. Cowan realiza una comparación del lenguaje silbado mazateco con el lenguaje silbado tepehua de Hidalgo, y concluye que este último "reproduce muchos de los movimientos fisiológicos de las sílabas habladas" a diferencia del lenguaje silbado del mazateco, en el cual no se presenta una articulación significativa de los labios. Busnel, después de haber descrito el lenguaje silbado de Aas (1960) y de Kusköy (1970), retoman los estudios de lenguaje silbado en la lengua mazateca que inicialmente había sido descrito por Cowan (1948). La investigación se llevó a cabo en 1972 en el distrito de Teotitlán del Camino y, entre los fenómenos que describe, se encuentra el caso de un joven mazateco que utiliza una hoja de café para silbar. Más tarde, en un trabajo de 1981 titulado "Bioacústica de la lengua silbada mazateca", este autor describe las diferentes técnicas de silbido que encontró entre los mazatecos, las cuales son esencialmente linguolabiales y dento-labiales. Es importante destacar que en este trabajo las grabaciones de dos silbadores que repitieron tres veces el mismo silbido fueron estudiadas por medio de un analizador de espectros.” (Vielma-Hernández, 2017).



Fig. 55 arreglo a la notación occidental de la frase en mazateco chiflado.

Dadas las limitaciones del sistema de notación occidental hubo que hacer varios recortes, pero los valores exactos que describen el tema son los siguientes, para las frecuencias en Hertz [1525, 1695.2767333984, 2379.177734375, 2022.3675537109, 2294.501953125, 2169.7102050781, 1994.4799804688, 2022.1071777344, 2241.0561523438, silencio, 2401.068359375, 2181.0920410156, 1833.8972167969, 1626.0791015625, 1924.8911132812], para los valores rítmicos en segundos [0.145, 0.205, 0.21, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0.145, 0.215, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1].

Además de la indicación de improvisar sobre el tema antes mencionado la indicación formal fue, entra la batería y el contrabajo, después el saxofón con una improvisación estilo free jazz. A la indicación cambiaría el ritmo más swing de la batería y le seguirán el contrabajo y el saxofón. Después, improvisación libre, por último, la electrónica y el saxofón tendrán preponderancia en la coda. Como se puede observar en todas las herramientas y decisiones composicionales se intentó alejarse del sistema musical y notacional occidental, no para negarlo por completo, sino para poder tener la posibilidad de alejarse y reincorporarse a este sistema de manera continua, a manera de glissando formal.

3.3.2 Lux Æterna

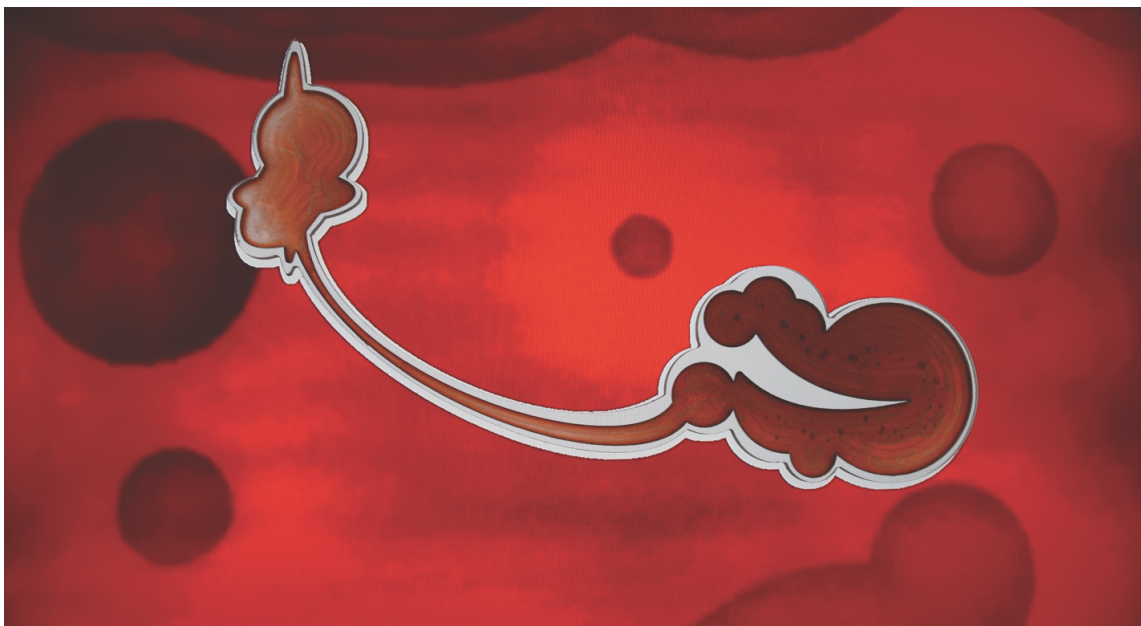


Fig. 56 Detalle de la instalación Lux Æterna

3.3.2.1 Descripción general de la obra

La existencia del ser humano y del universo mismo supone una eterna transformación. La materia, energía e información cambian constantemente y de una manera permanente. Nosotros nos configuramos en ese devenir durante un tiempo y un espacio determinado y después de morir solo permanece la información que ayudamos a crear o transformar, se queda como cicatriz en el eterno espacio/tiempo.

Lux Æterna es una obra de arte generativo audiovisual híbrido que trata sobre variaciones en los relojes que componen nuestro devenir en el mundo, por ejemplo, nuestro reloj circadiano, los eventos climáticos circanuales, etc. Y al ser generativa está compuesta de algoritmos de diversos tipos, sonoros, visuales y químicos, por lo que nunca repite sus contenidos de la misma forma. La ficha técnica de esta obra es: Policarbonato sólido, oscilador químico, algoritmo de video digital, algoritmo de sonido binaural.

El montaje en el espacio de exposición es una pantalla de 32 pulgadas acostada montada sobre un pedestal de madera que contiene una computadora de donde salen el video y el audio. Al ser una mezcla binaural el sonido estéreo debe ser reproducido a través de audífonos.



Fig. 57 Lux Æterna en la exposición Creación en Movimiento de Jóvenes Creadores del FONCA en el Centro de las Artes de San Agustín. Oaxaca 2018.



Fig. 58 Lux Æterna en la exposición Creación en Movimiento de Jóvenes Creadores del FONCA en el Centro de las Artes de San Agustín. Oaxaca 2018.

Esta obra está dedicada a la memoria de Manrico Montero, compositor y artista sonoro mexicano, tutor del autor durante el período del programa Jóvenes Creadores del FONCA, gracias al cual se desarrolló esta obra.

3.3.2.2 Algoritmo de video digital

La computadora que se encuentra dentro del pedestal contiene un algoritmo desarrollado en Processing que lo que hace es desplegar una máscara blanca con la forma de la pieza de policarbonato sólido y un video del oscilador BZ y cambia parámetros en la tasa de reproducción del mismo. Cada 3, 5 o 7 minutos aleatoriamente cambia la velocidad de reproducción y su sentido, normal o al revés. También cambia ligeramente el tono del video dentro de un espacio de color que combina con los colores del oscilador.

3.3.2.3 Oscilador Belousov-Zhabotinsky en placa de policarbonato

Esta obra trata de poner un acento en el tiempo y nuestra percepción de él debido a la duración del oscilador. En una placa de Petri de 10 cm el oscilador se oxida por completo en 1 hora con 20 minutos aproximadamente, esto es un biofilm de 78.54 cm². En el caso del biofilm en esta obra, tarda en completar su proceso completo en 4 horas, por lo que representa para el público un tiempo que generalmente no pasa en una sala de conciertos poniendo atención a una obra. Además, el tiempo en que sucede un cambio perceptible es tan largo que se rompe la idea de secuencialidad que hay en la música tradicional que se presenta en una sala de conciertos. Por otro lado también, la presentación de la obra en un espacio expositivo permite al espectador decidir cuánto tiempo contemplará la obra.

Esta obra intenta presentar una forma musical conocida como canon de una manera nueva que el formato concierto no puede permitir, el espectador puede contemplar una sola gran transformación de 4 horas entre la reacción química en tiempo real y videos de la reacción en donde se juega con la velocidad de reproducción del video y otras variables para contrastar el devenir de la materia con el mundo digital.

La forma de la pieza de policarbonato sólido se compuso como una estetización del lenguaje de programación generado en este proyecto, mezclado con una composición de diferentes abstracciones del oscilador BZ en acción como lo podemos apreciar en la siguiente prueba de concepto contrastada con la composición final (Fig. 59). Se asume que la forma alargada entre las dos aglomeraciones de círculos funciona como una especie de resistencia que permite que haya un politempo en el mismo oscilador.

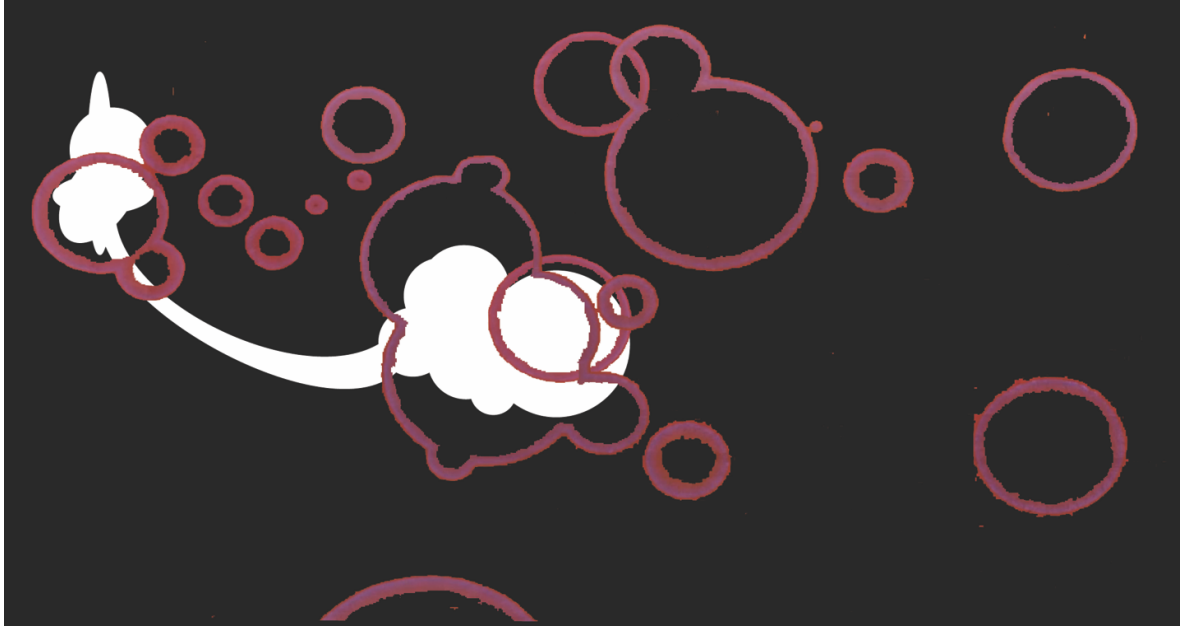


Fig. 59 Primera prueba de concepto contrastada con la pieza final.

3.3.2.4 Algoritmo binaural, sonido estéreo

Los audífonos que salen del pedestal están conectados a la computadora que contiene la multimedia de la obra y esta tiene el algoritmo de supercollider con el que se sonifica la obra. Este contiene una versión simplificada del modelo de ruido BZL, este algoritmo se divide en dos partes, la primera es la versión simplificada del modelo de ruido BZL (se simplificó en esta versión para poder componer sus transformaciones en el tiempo de manera no determinista), y la segunda es la librería de síntesis espectral binaural que permite espacializar el sonido en los audífonos y lograr una escultura sonora al estilo del cubismo analítico.

Para llegar al algoritmo de supercollider utilizado en esta obra y su aplicación formal y composicional tendremos que explicar la experimentación desarrollada por el autor en otro de los experimentos de extracción de señal y su análisis del oscilador BZ.

MEA colorimétrico

Dada la inaccesibilidad de implementar para esta investigación un arreglo de sensores analógicos de pH para medir las fases de oxidación del oscilador se pensó en encontrar una solución por medio de la visión computarizada. Se retoma la experiencia de análisis oscilación singular de magnitud de la red neuronal química para escalarla. Se generó una rejilla de 11281 puntos en círculos radiales y el vector de magnitud de color fue asignado a la amplitud de 11281 osciladores sinusoidales partiendo de 60 Hz. En la siguiente figura se puede observar el visualizador de este MEA colorimétrico, solo los puntos por los que pasan los frentes tienen amplitud mayor a 0, es decir, suenan (Fig. 60).

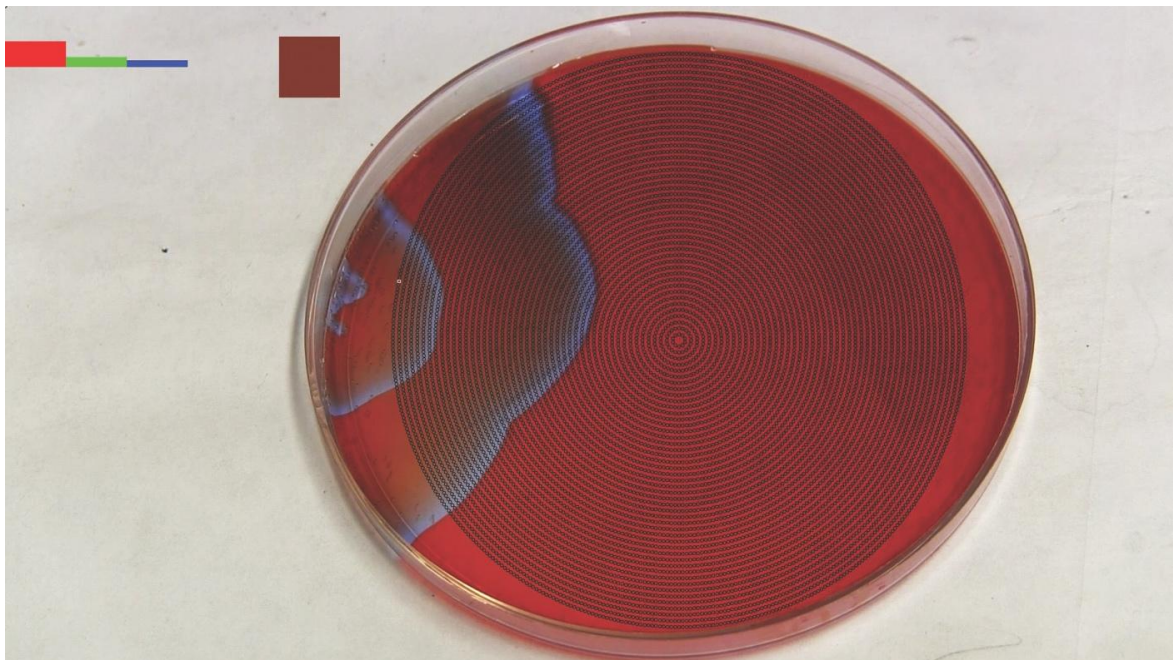


Fig. 60 sistema MEA colorimétrico.

Al hacer sumar diversos osciladores al mismo tiempo suceden cancelaciones y multiplicaciones de fase, esto quiere decir que hay oscilaciones de amplitud, vibratos. Al tener 11281 diferentes vectores de fase y amplitud emergen diferentes ritmos con diferentes fases de repetición. Esto abre la posibilidad a tener otra variable relevante para la composición, la fase de cada uno de los osciladores. Este ritmo tímbrico se conceptualiza como un canon estacionario no desplazable, es decir no al estilo fugado. Para esta obra se utilizaron 3 estrategias para la

composición de esta variable, la primera y más interesante a la hora de componer una obra sonora tipo instalación, cambiar de manera aleatoria la posición de la fase entre todos los osciladores (de 0 a 2π), la segunda mapear la fase, cuando la magnitud de color es 1 la fase del oscilador es π , y la tercera es cuando la magnitud de color es 1, la fase es 1.5π o 0.5π dependiendo de la ubicación del punto en el oscilador.

Esta técnica se inscribe en el conjunto de síntesis de audio no lineales dado que los osciladores no se conectan directamente el uno con el otro como podría pasar en la síntesis FM (frecuencia modulada), en donde uno de los osciladores controla el valor de frecuencia (modulador) del oscilador que produce el sonido (portador). En este caso los osciladores están relacionados por las geometrías autoorganizadas de los frentes de expansión de oxidación del oscilador, y el resultado sonoro genera una rítmica canónica espectral en función de la relación de fase de los osciladores que están sonando en cada una de las fases del oscilador químico. Podría considerarse también como una técnica inversa al filtro de peine, la diferencia es que con este modelo de ruido (que llamaremos BZL) uno tiene total control de la configuración de vectores y magnitudes de los parciales lo que permite ahondar y sacar provecho de manera composicional del vibrato interno que tiene este modelo de ruido. Vemos a continuación un espectrograma del resultado de este proceso de sonorización de este fenómeno de autoorganización (Fig. 61).

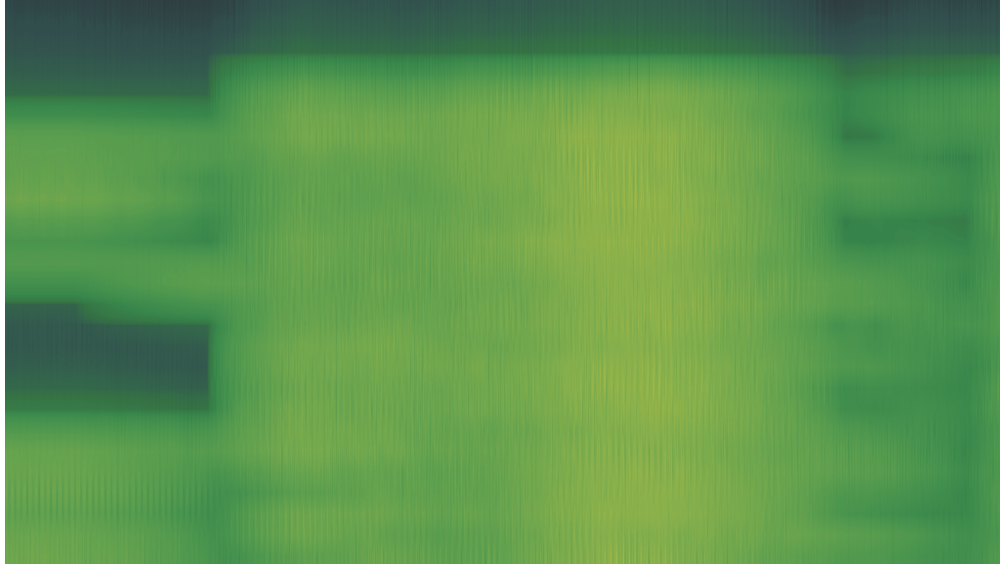


Fig. 61 Espectrograma de la evolución del modelo de ruido BZL, sonificación del MEA colorimétrico.

El sistema de esta obra no pretende sonificar en tiempo real la reacción, pero tampoco hacer archivos digitales en tiempo diferido, por lo que los algoritmos que permiten que esta obra se anime y tenga variaciones en el tiempo están basados en modelos matemáticos. En este caso, el productor del ruido BZL tiene este sistema de ecuaciones como base, el *brusselator* (Tyson 1973).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = A - (B + 1)x + x^2y + D_1 \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2},$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = Bx - x^2y + D_2 \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2},$$

Síntesis de granulación espectral binaural

La síntesis granular es un tipo de síntesis enunciada por Dennis Gabor en 1946 e implementada por el compositor Iannis Xenakis en 1969, y consiste en cortar pequeñas muestras de sonido de manera sincrónica y asincrónica. En el caso de esta obra se utiliza una librería desarrollada por el autor de granulación espectral, esta es un tipo de granulación asincrónica, esto quiere decir que no consiste en desmembrar una señal compleja en su cualidad temporal, sino en su contenido armónico. Pongamos un ejemplo, la granulación sincrónica consistiría en hacer

cortes a nuestra cinta o archivo digital en los cruces en cero y silenciar algunos o reacomodarlos de manera aleatoria. Por otro lado la granulación asincrónica del tipo espectral corta la señal en bandas de frecuencia, para la primera banda la señal es sometida a un filtro pasa bajas que solo permite el sonido de contenido entre 1 Hz y 60 Hz, la para la segunda banda la señal es sometida a un filtro pasa bandas que solo permite el sonido contenido entre 60 Hz y 120 Hz, y así sucesivamente hasta llegar a la última banda que pasa por una filtro pasa altas y deja solo los sonidos a partir de una frecuencia, digamos 6000 Hz hasta los 20,000 Hz o el límite que la tasa de sampleo permita, una vez procesada la señal por los filtros se puede espacializar independientemente cada banda.

Esta librería fue utilizada por primera vez en 2013 para la obra (De/Re)construcciones Fecales, una obra en la que se utiliza un ruido blanco y la construcción composicional consiste en la espacialización de este ruido dividido en 10 bandas de frecuencia, sus ubicaciones, ritmos y trayectorias. Esto como respuesta a la sentencia que se escucha tan a menudo en la academia respecto a la espacialización “antes de espacializar hay que lograr componer una obra que funcione bien en mono” y esta es una obra que simplemente no pude ser apreciada sin un sistema multicanal ya que la mezcla en mono resultaría en un sonido blanco monolítico e inmutable. A partir de ahí se le han implementado diversos tipos de tecnología, como el control gestual tridimensional a partir de un sensor tridimensional *LEAP Motion* y aplicación a diversos tipos de sistema multicanal (cuadrafonía, octofonía en forma de círculo, octofonía en forma de cubo, estéreo binaural, etc.) y el número de divisiones del espectro puede llegar hasta 100.

En el caso de esta obra se utilizó la configuración de sonido binaural con 10 divisiones del espectro. La estrategia de composición se basó en el siguiente proceso, se le hace una extracción de fondo al video con el primer cuadro del oscilador, después se le aplica el algoritmo de blobs a los frentes de expansión y la posición de los puntos que conforman los bordes de los blobs se convierten a coordenadas esféricas y se mapean a la posición del espacializador (Fig. 62).

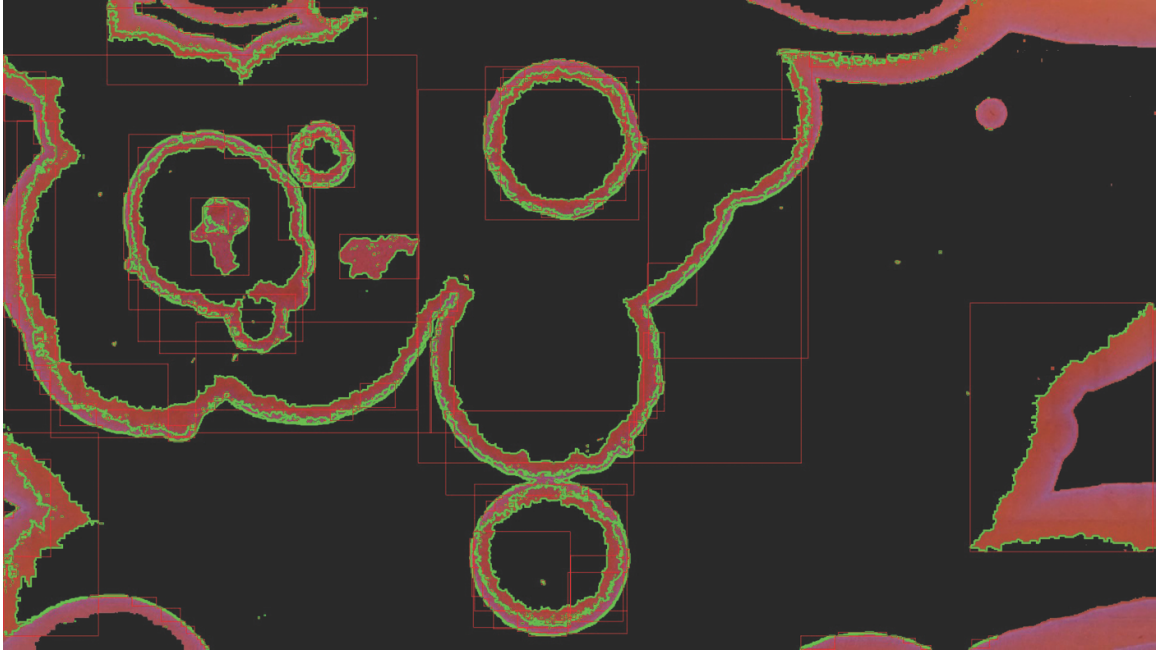


Fig. 62 los contornos verdes son los bordes de los blobs que dan la posición en la mezcla sonora a cada una de las 10 bandas.

3.3.3 Île

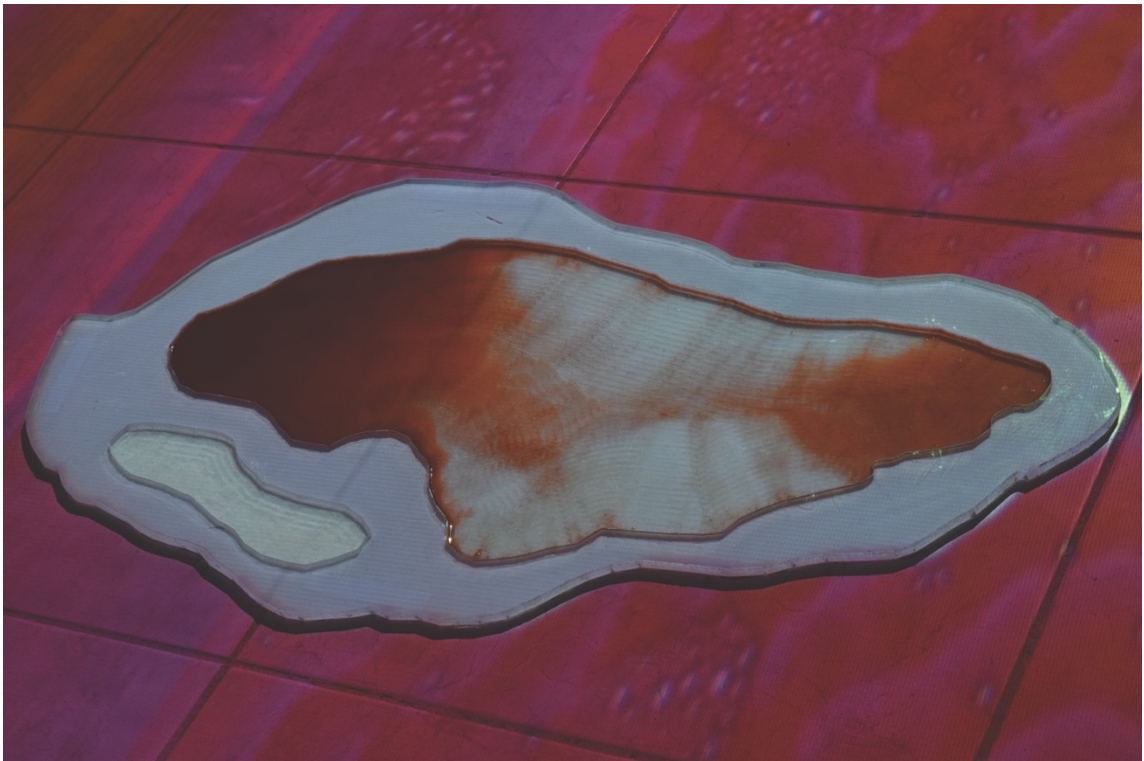


Fig. 63 Detalle de la instalación Île.

3.3.3.1 Descripción general de la obra

Esta es una obra de arte híbrido ya que está compuesta por diversos soportes y técnicas que se complementan entre sí. Se podría considerar como una extensión de la obra Lux Æterna y que recoge toda la experiencia del proyecto en total. El concepto de arte generativo le da cohesión conceptual a esta obra inmersiva donde el público puede experimentar la interacción de todos los osciladores acoplados como una topología sonora de transformaciones continuas en las que la ubicación del público es vital para navegar por la forma de la obra que no solo se articula en el tiempo sino en el espacio.

El nombre de esta instalación es el vocablo francés para isla, una isla de contemplación individual que se comparte a través de la experimentación del discurrir de la materia y la energía en el tiempo, un espejo fenomenológico del devenir de la humanidad como colectivo.

El montaje consta de un bajorrelieve de policarbonato sólido que contiene el oscilador químico, una proyección con un video que se despliega de manera algorítmica en tiempo y edición, una cuadrafonía por donde se escucha una versión más granulada del modelo de ruido BZL y un laboratorio en donde se mezcla el oscilador en vivo como parte performativa de la obra en ciertos momentos específicos.



Fig. 64 Laboratorio de activación performática. Detalle de la instalación Íle, estrenada en la exposición titulada “La Revuelta” realizada en el Centro Estatal del Conocimiento y las Artes en la ciudad de Durango en 2018.



Fig. 65 Íle, estrenada en la exposición titulada “La Revuelta” realizada en el Centro Estatal del Conocimiento y las Artes en la ciudad de Durango en 2018.



Fig. 66 Íle, estrenada en la exposición titulada “La Revuelta” realizada en el Centro Estatal del Conocimiento y las Artes en la ciudad de Durango en 2018.

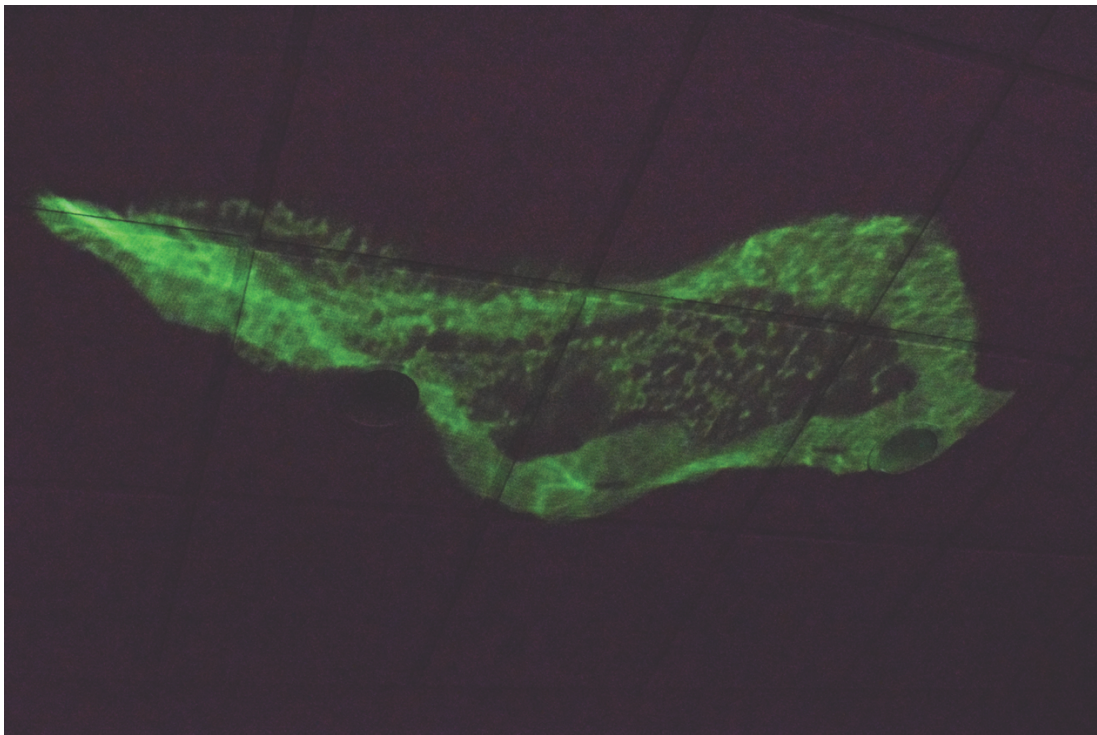


Fig. 67 Detalle de la instalación Íle, estrenada en la exposición titulada “La Revuelta” realizada en el Centro Estatal del Conocimiento y las Artes en la ciudad de Durango en 2018.

El trabajo de composición del video generativo y del diseño del bajorrelieve pasaron por un proceso similar al de la obra *Lux Æterna*, por lo que para este apartado nos enfocaremos en la extensión de la composición sonora y la activación performática.

3.3.3.2 Composición sonora

El componente sonoro de esta instalación se basa también en el modelo de ruido BZL, pero en esta obra, la flecha del tiempo puede ir en las dos direcciones es decir que no se hace un crescendo tímbrico como pasará en la sonificación completa del modelo de ruido, sino que el algoritmo escoge de manera estadística diferentes momentos en la concentración del oscilador. Por otro lado, la difusión del sonido en el espacio está mezclada en 4 canales independientes lo que hace que la obra interactúe con el espacio físico de la exposición y descubra un elemento extra en la composición que es la perspectiva, es decir, la ubicación en el espacio del público como elemento articulador del discurso tímbrico-rítmico.

En esta obra también se utiliza la versión de 11281 osciladores independientes por motivos de potencia de cómputo, ya que el algoritmo articula la obra en tiempo real y para sonificar 20,000 osciladores se necesita hacerlo por bandas de frecuencia y mezclarlas en tiempo diferido. Por otro lado, también se prefiere el nivel de aspereza³⁴ que se logra con la mitad de osciladores para el perfil sonoro afín al concepto de la obra. Este acercamiento experimental a la armonía, permite describir de mejor manera lo que sucede en esta obra.

³⁴ Suavidad-aspereza como se menciona en el sistema de armonía experimental curvas de disonancia. “Las curvas de disonancia son el punto de partida para una investigación sobre armonía informada por ideas de la psicoacústica. La principal hipótesis de esta investigación, la dualidad armónica, consiste en postular que los materiales armónicos en la música tienen dos aspectos independientes pero entrelazados que operan simultáneamente: la proporcionalidad y la altura-distancia. La primera se relaciona con los ‘caracteres’ de los intervalos, mientras que la segunda concierne aspectos como ‘agudo’, ‘grave’, ‘brillante’, ‘oscuro’ y por lo tanto es considerada la faceta tímbrica. Las ideas y resultados de este estudio proceden del desarrollo de herramientas para la composición algorítmica que extraen materiales de alturas a partir de señales de audio, analizándolas de acuerdo a sus cualidades tímbricas y armónicas para ponerlas en movimiento mediante diversos procedimientos texturales y rítmicos.” (Lach, 2012).

Las variables sonoras que se articulan en el sistema son:

- Porcentaje de oxidación: esto se convierte en el número de osciladores con amplitud mayor a cero. Pongamos un ejemplo, en la siguiente figura Fig. 68 podemos ver el oscilador recién empezado, digamos a 1% de oxidación. Esto quiere decir que solamente 112 osciladores pueden ser escuchados, los 11169 restantes estarán en completo silencio.

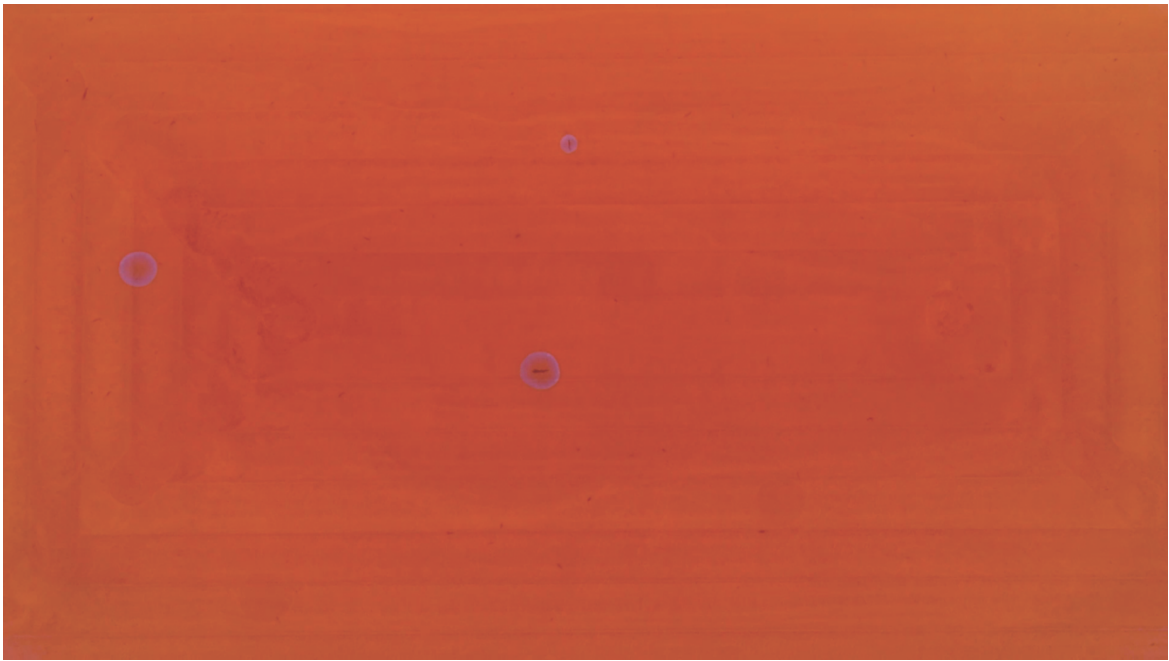


Fig. 68 Oscilador a 1% de oxidación.

- Geometrías de las concentraciones: Los patrones geométricos que emergen de manera autoorganizada en el oscilador definen no cuántos, sino cuáles son los osciladores que sonarán. Es decir, en otro oscilador Fig. 69, también al 1%, las secciones en color morado serán las que definan qué frecuencias son las que van sonar dentro de los 112 osciladores.

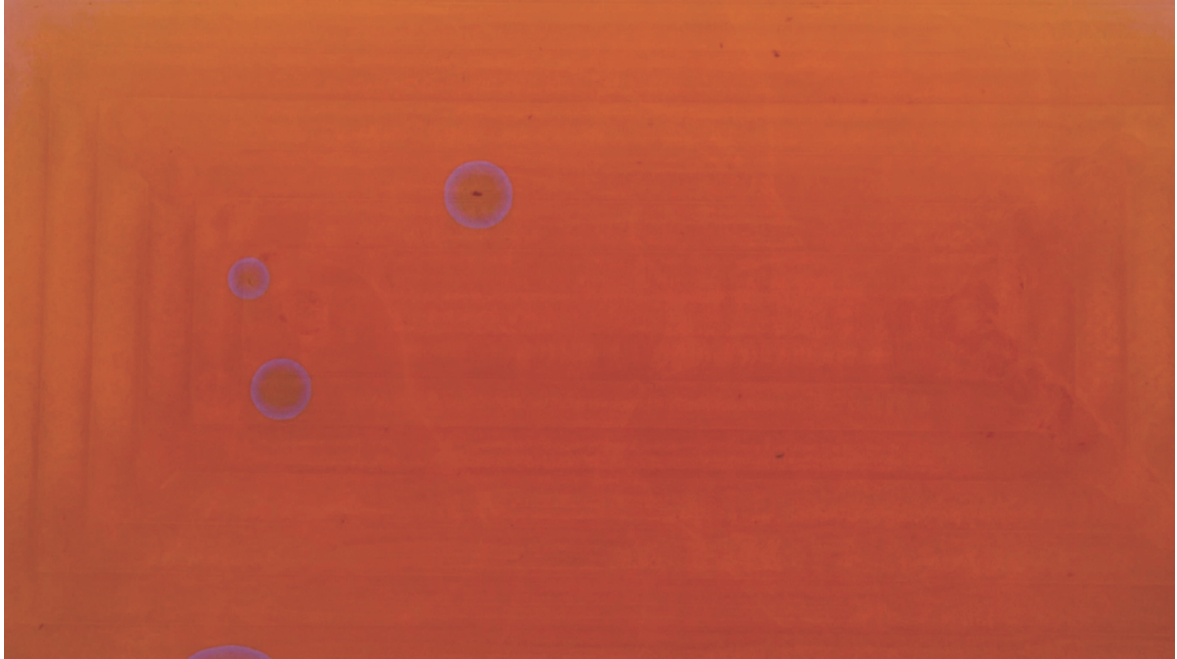


Fig. 69 Geometrías de las concentraciones. Las posiciones en el plano de los píxeles en color morado serán las frecuencias de los osciladores que se escucharán. Esta relación puede cambiar a diseño del usuario.

- Flujo óptico: “En visión por computadora, el flujo óptico es un campo de velocidad asociado con cambios de imagen. Este efecto generalmente aparece debido al movimiento relativo entre el objeto y la cámara o al mover las fuentes de luz que iluminan la escena. La mayoría de los enfoques para estimar el flujo óptico se basan en cambios de brillo entre dos escenas.” (Aires, Santana y Medeiros, 2008) En otras palabras, de cada píxel se hace un análisis de color de los píxeles adyacentes y se compara el penúltimo cuadro con el último para poder obtener un vector con dos coordenadas, un ángulo y una magnitud. Así de esa manera podemos tener un número que nos indique hacia donde se están moviendo las cosas que aparecen en nuestro video, en este caso particular, los frentes de onda. Como podemos ver en la Fig. 70 hay varias líneas verdes, en las zonas en donde solo se ven puntos verdes significa que no hay movimiento y en las zonas donde hay líneas significa que hay movimiento. Esta información se mapea a la fase de cada uno de los osciladores en radianes (de 0 a 2π).

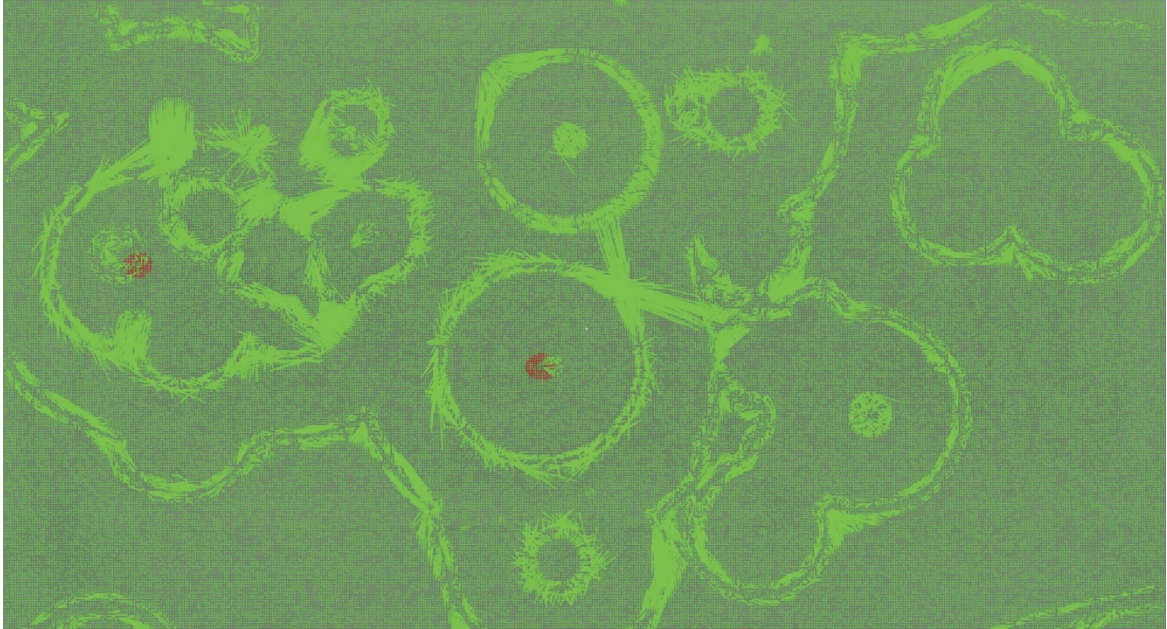


Fig. 70 Análisis de flujo óptico que genera la información de las fases de cada uno de los osciladores.

- Perfil de crecimiento de las los frentes de onda. El crecimiento de los frentes de onda en la reacción es constante, pero dependen de diferentes variables como luz y temperatura (entre otras). Para este algoritmo se toma la velocidad promedio descrita en el mecanismo FKN que es de $1 \times 10^4 \text{ M}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Field, Koros y Noyes, 1972). Este comportamiento es el que se persigue para la espacialización. Cada una de los osciladores tiene su propia función de espacialización independiente en cuadrafonía (Pan4.ar).

Tratamiento formal de la obra.

Cuenta la leyenda que el compositor Erik Satie frecuentaba la casa de Claude Debussy, y en una de esas visitas Debussy le hace la sugerencia de cambiar la forma de sus composiciones, a lo que Satie responde con la obra Tres Piezas en Forma de Pera. Esto como una ironía y burla a la sujeción de la música académica con la forma musical, pero también como premonición al cambio de paradigma que se vendría después en el siglo XX.

“El término «forma» se utiliza con varios sentidos distintos. Cuando se usa en conexión con «binaria», «ternaria» o «rondó», se refiere claramente al número de partes. La indicación «forma sonata» sugiere, sin embargo, el tamaño de las partes y la complejidad de sus relaciones. Al hablar de «minuet», «scherzo» y otras «formas de danza» se tiene en la mente el compás, el tempo y las características rítmicas que identifican la danza.

Utilizada en un sentido estético, la palabra forma quiere decir que una pieza está «organizada», es decir, que consta de elementos que funcionan como los de un «organismo» vivo.

Sin organización la música sería una masa amorfa, tan ininteligible como un ensayo sin signos de puntuación, o tan inconexa como una conversación que salta sin propósito alguno de un tema a otro.

Los requisitos fundamentales para la creación de una forma inteligible son la «lógica» y la «coherencia». La presentación, desarrollo e interconexión de las ideas deben estar basadas en un «parentesco» o relación. Las ideas deben diferenciarse según su importancia y su función.

Es más, uno solo puede entender lo que puede guardar en la mente. Las limitaciones mentales del hombre le impiden aferrarse a cualquier cosa demasiado extensa. Así la subdivisión apropiada facilita la comprensión y determina la «forma» (Schönberg, 1989).

Esta definición de forma que el compositor Arnold Scöenberg escribe en 1967 todavía está ligada al formato tradicional de concierto occidental académico en donde el público tiene que entrar a una sala de conciertos y escuchar de principio a fin una obra musical, esto quiere decir que para entender una parte de la estructura e inclusive una sola nota se tiene que haber escuchado lo que venía previamente y lo que se escuchará después, de ahí la aseveración de Scöenberg de que “uno solo puede entender lo que puede guardar en la mente”. Esto hace del concepto “forma musical” un fenómeno secuencial, y una de las bases fundamentales para llamar a

la música un arte del tiempo. Pero con las vanguardias los creadores empezarán a estirar es concepto para abrir la puerta a nuevas perspectivas en torno a la organización de un texto sonoro.

Si cambiamos el formato de presentación de una obra sonora y, en lugar de aprisionar al escucha, le damos la libertad para escuche el tiempo que quiera la obra sonora, los conceptos de forma tradicional dejan de funcionar porque puede que el escucha no tenga la información necesaria para hacer las relaciones estructurales y no sabrá cual es el principio, final o clímax. Por lo que el compositor necesita desarrollar más estrategias para la creación de obras sonoras, que le permitan al escucha llevarse una idea del texto, así lo escuchan cinco segundos o diez minutos. Lo que nos acerca más a una composición más enfocada a un entendimiento del tiempo presente, despojando así de la creación a las referencias temporales y a la necesidad de emparentar sonidos, es un fenómeno más parecido a un objeto de contemplación que a una serie de tiempo, por lo tanto, es más fácil estructurar una obra en torno a características objetuales como puede ser la forma tridimensional de la obra y su posición en el espacio. De esta manera se puede dar al público una experiencia que resalte la espacialidad de la obra a través de la inmersividad.

Emergencia topológica del canon tímbrico-rítmico no desplazable

En síntesis de audio se puede construir cualquier señal compleja a partir de la suma de osciladores sinusoidales, a este proceso se le conoce como síntesis aditiva y es la estrategia que se siguió en la composición de modelo de ruido BZL.

En el caso de supercollider, se utilizó el objeto SinOsc.ar, el cual permite modificar 4 parámetros de nuestro oscilador: el primero es la frecuencia (en Hertz), fase (en grados radianes), amplitud (en normalización digital) y suma (cualquier número real). A continuación, explicamos cómo es que las relaciones entre estos cuatro parámetros generan la forma de esta obra.

Caso 1.

Cuando tenemos dos osciladores con la misma amplitud su relación en la fase puede generar consecuencias en la amplitud. Supongamos que tenemos nuestros osciladores en 440 Hz y amplitud 1.0, las posibilidades en la fase pueden ser entre 0 y 2π . Si los dos osciladores empiezan en 0 rad ocurrirá una interferencia constructiva, esto quiere decir que el sonido resultante tendrá el doble de amplitud que las señales originales. Fig. 71.

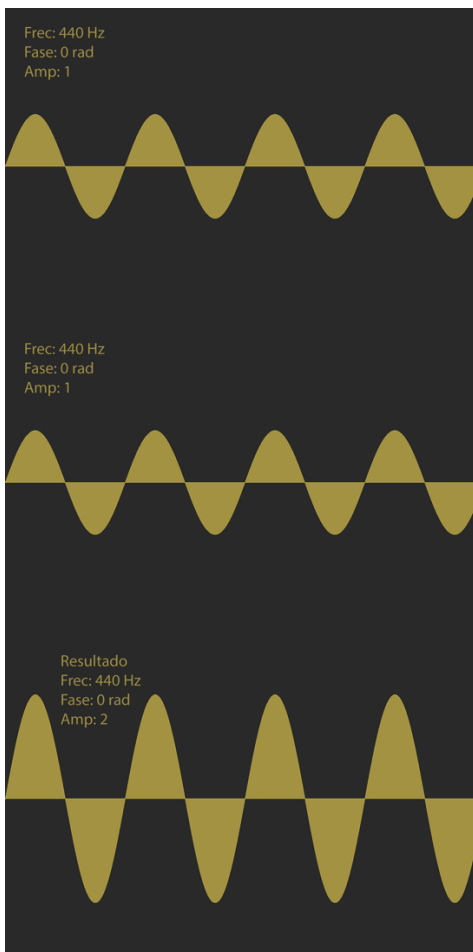


Fig. 71 Caso 1, dos osciladores con misma frecuencia, misma fase y misma amplitud generan una interferencia constructiva que producirá una señal con el doble de amplitud.

Caso 2.

El caso contrario es cuando tenemos dos osciladores con misma frecuencia, misma amplitud, pero empiezan la fase en periodo contrario, es decir, una empieza en fase 0 rad y la segunda en π rad. Esto genera una interferencia destructiva que producirá silencio total.

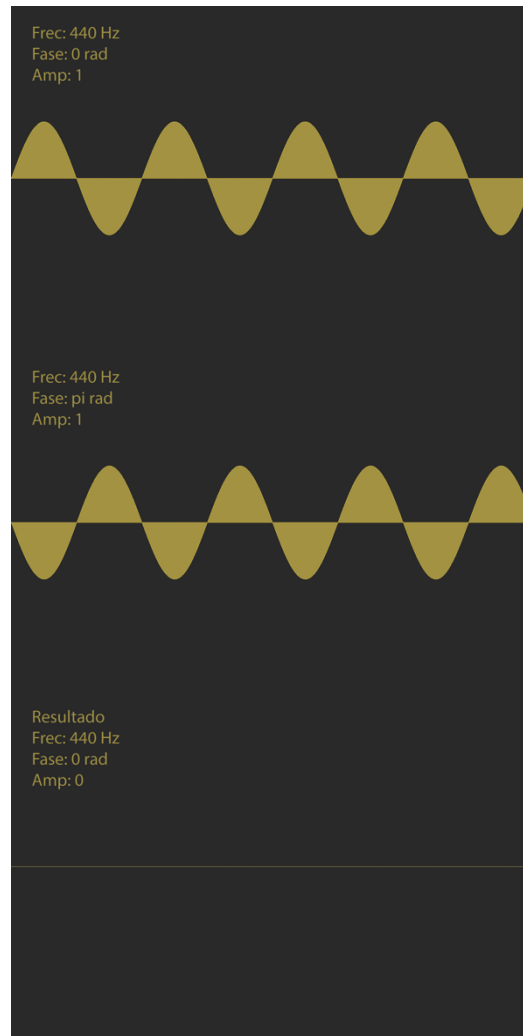


Fig. 72 Caso 2, dos osciladores con misma frecuencia, misma amplitud, pero fase contraria generan una interferencia destructiva que producirá una señal con amplitud cero.

En el caso en el que uno de los osciladores empiece en 0 rad y el segundo en 0.5π rad también reforzará la amplitud de la señal resultante, pero no al doble, sino la mitad.

Caso 3.

Ahora nos enfocaremos en los batimientos, esto es la relación entre frecuencias, también está relacionado con la interferencia entre señales. En este caso se genera un tremolo, es decir, una variación en la amplitud de manera regular. Por ejemplo, tenemos un oscilador con frecuencia 440 Hz, y el segundo con frecuencia 441 Hz, el resultado será un batimiento de 1 vez por segundo, esto calculándolo con la fórmula $f_{\text{bat}} = |f_1 - f_2|$. Fig. 73.

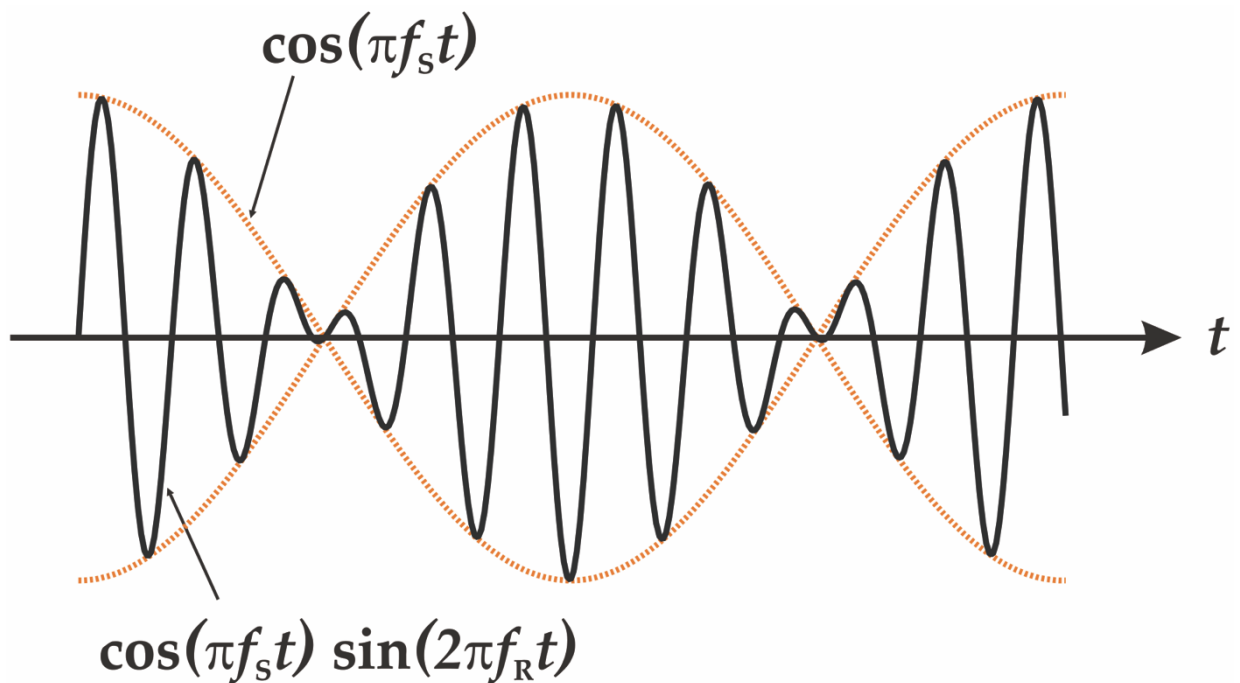


Fig. 73 Esquema del batimiento.

Estas relaciones se complejizan de manera holística porque se relacionan todas las frecuencias con las demás, es decir, el oscilador con frecuencia 1 en relación con el oscilador con frecuencia 2 generarán un ritmo de 1 sonido y un silencio en crescendo y disminuyendo por segundo, si vamos cambiando la relación de fases entonces habrá 1 más fuerte y otro más débil, acentuando como lo hacen los compases en la música tradicional. El oscilador con frecuencia 1 en relación con el oscilador con frecuencia 3 generaran un ritmo de 2 beats por segundo y si además le sumamos la variación de fase tendremos una riqueza de articulaciones rítmicas de factorial 2, y así sucesivamente con los 11,281. Ahora sumemos las complejidades de las relaciones del oscilador con frecuencia 3, y luego 4, etc. Al

utilizar el modelo de ruido BZL como estrategia de composición no siempre van a sonar todos los osciladores sino porcentajes y esto hará aparecer ciertos perfiles tímbrico-rítmicos.

Elementos de perspectiva o cómo incluir la posición del escucha como elemento estructurador del discurso sonoro.

Como dijimos con anterioridad esta es una obra sonora que se presenta como una instalación audiovisual inmersiva, por lo que la forma de esta obra no está ligada a la secuenciación temporal de eventos, sino a su forma tridimensional, es decir, que su forma se encuentra desdoblada en el espacio así que es necesario para el público navegarla, una narrativa no lineal. Esto implica que es imposible que el público se lleve la totalidad de la obra, sino solo el resultado de sus decisiones de movimiento en el espacio, de ahí el nombre de la obra “isla” aún hoy en día con las teorías de la existencia de multiversos las restricciones de nuestro sistema cognitivo nos siguen manteniendo en un punto muy particular del espacio y nos obligan a poner todo el tiempo las cosas y los fenómenos en perspectiva. La esperanza de que el público puede llevarse la misma información que imagina y plantea el compositor es solo una ilusión de control muy obsoleta para nuestros días, las partituras en donde todos los parámetros de la música están notados con extrema rigurosidad y el diseño de salas a manera del teatro a la italiana son parte del espíritu positivista de una época que ya ha quedado a tras.

Entonces, al abrir la posibilidad de navegación de la forma por el público habrá sonidos que le queden más lejos y por lo tanto en perspectiva con los que tenga más cerca ¿Cómo se articula este fenómeno en la obra?

Caso 4.

Espacialización. Esta obra está mezclada en cuadrafonía esto quiere decir que hay cuatro canales independientes que difunden el sonido en el espacio y nos pueden

dar la ilusión de movimiento al variar las amplitudes de salida de cada uno de las bocinas. El objeto de supercollider que se utiliza para este caso es Pan4.ar, a diferencia de las obras pasadas, en las que se utilizaba la librería de granulación espectral, en esta solo se usa el objeto porque cada una de las formantes tiene la posibilidad de ser espacializada de manera independiente, no por bandas de frecuencia sino átomo por átomo.

El objeto Pan4.ar tiene 4 argumentos, la señal a ser espacializada (aquí va la el oscilador), la posición en x (de -1 a 1, 0 siendo el centro entre izquierda y derecha), la posición en y (de -1 a 1, 0 siendo el centro entre delante y detrás), amplitud y suma. Cuando colocamos el oscilador en el centro (coordenadas 0,0) la salida resultante se escucha por las cuatro bocinas con la misma amplitud y conforme la coordenada se acerca a una esquina las demás bocinas van atenuando su amplitud hasta convertirse en silencio total, salvo la bocina indicada. Pongamos un ejemplo.

Supongamos que tenemos un oscilador con frecuencia 1 Hz y el segundo con frecuencia 2 Hz, el primero se ubica en el espacializador en la coordenada (0,0) y el segundo en la coordenada (1,1), esto quiere decir que el primer oscilador va a sonar con la misma energía en las cuatro bocinas y que el segundo solamente sonará en una bocina, al frente y a la derecha. Esto rompe la simetría de la posición y hace relevante la posición del escucha para la composición sonora, puede escuchar un batimiento o solo un sonido, si el escucha se encuentra en (-1,-1) solo escuchará el primer oscilador y conforme se vaya acercando a (1,1) hará emerger el batimiento en su experiencia de escucha Fig. 74. De esta manera el público va desenterrando su propia versión de la obra, así como un arqueólogo desentierra vestigios de civilizaciones pasadas para poder reflejarse en ellas en el presente.

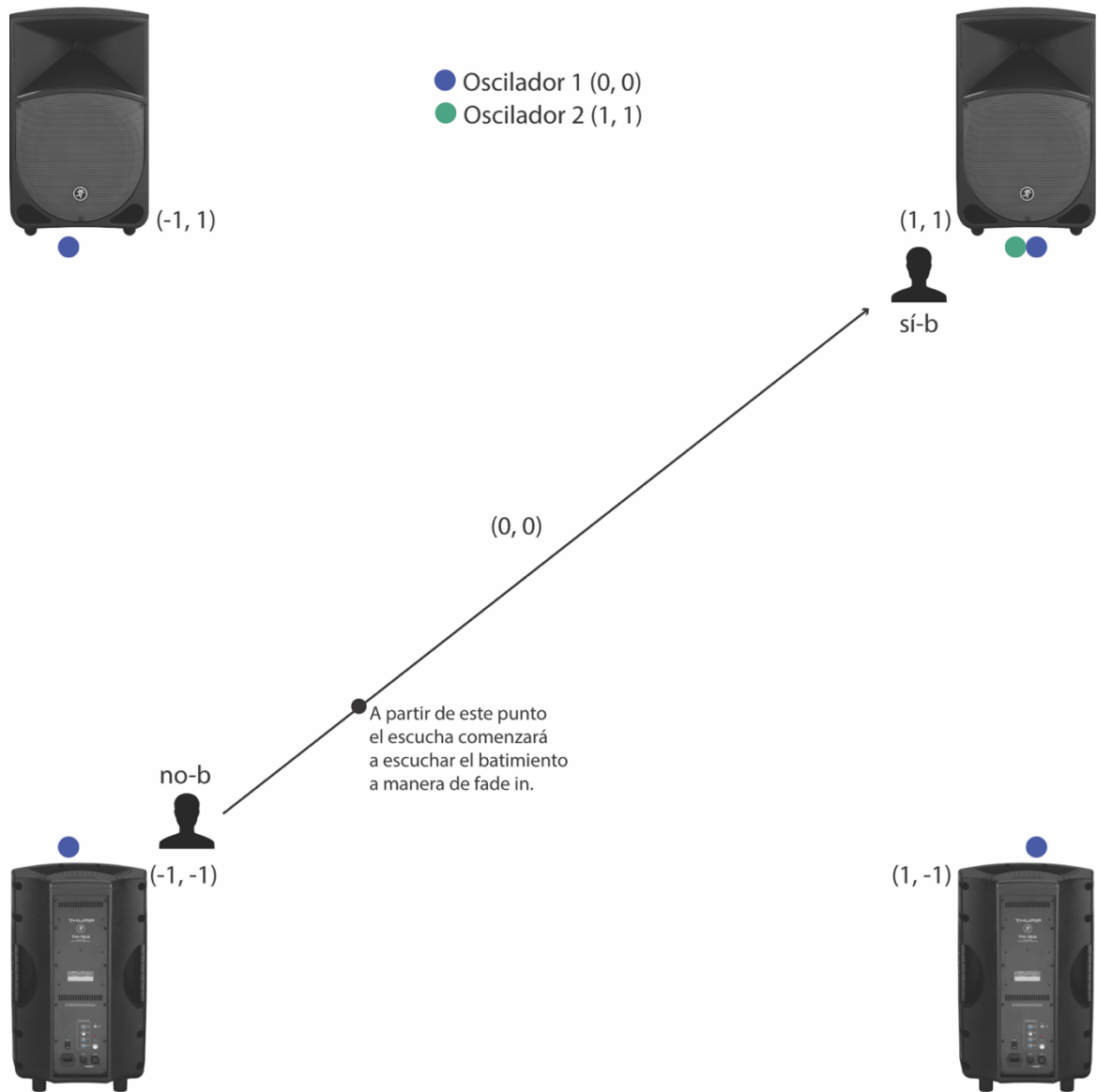


Fig. 74 perspectiva del escucha relacionada con la espacialización.

Esta es solo la relación entre dos osciladores y además el algoritmo de espacialización cada cierto tiempo cambiará las coordenadas de cada uno de los osciladores por lo que visitar la instalación más de una vez puede ser relevante porque la experiencia siempre será diferente, no lo suficiente como para pensar que se está escuchando otra obra, pero sí para evitar que se guarde en la memoria eventos específicos y así reforzar la intención de no crear una pieza secuencial sino tridimensional y contemplativa, más cercana a una escultura que a una obertura.

Por último, se agrega la capa de interacción entre el modelo de ruido BZL y la forma/material físico del espacio de presentación.

Caso 4.

Cuando se difunde un sonido en un espacio en específico, este viaja en tres dimensiones, y empieza a interactuar con el espacio y con los objetos que se encuentran en él. Dependiendo de la forma y el material con el que están hechos, el sonido los atraviesa, es absorbido o reflejado. Es aquí donde sucede la última interferencia que agrega la última capa de transformación a la obra.

“Este fenómeno, que tiene el nombre adecuado de onda estacionaria, se debe a interferencia con las ondas reflejadas, que tienen la misma longitud de onda, amplitud y rapidez que las ondas incidentes. Puesto que las dos ondas idénticas viajan en direcciones opuestas, el flujo neto de energía por la cuerda es cero. Efectivamente, la energía se mantiene estacionaria en las curvas. Algunos puntos de la cuerda permanecen inmóviles en todo momento y se llaman nodos. En tales puntos, los desplazamientos de las ondas en interferencia siempre son iguales y opuestos. Por el principio de superposición, las ondas en interferencia se cancelan totalmente en esos puntos y la cuerda no se desplaza ahí. En todos los demás puntos, la cuerda oscila hacia arriba y hacia abajo con la misma frecuencia. Los puntos de máxima amplitud, donde se da la mayor interferencia constructiva, se llaman anti-nodos.”
(Wilson, 2007).

En el caso de nuestra obra no tenemos una cuerda, tenemos un espacio lleno de un medio elástico, por lo que en este caso para la percepción los nodos serán puntos en el espacio en donde el público podrá escuchar con menor amplitud cierta frecuencia, o escucharla con más amplitud en el caso de los antinodos, esto para cada una de las frecuencias, por lo que tendremos estos articuladores finales a los miles de trémolos de este canon tímbrico-rítmico no desplazable.

3.3.3.3 Activación performática

En esta instalación se muestra el oscilador químico en contrapunto temporal con videos del oscilador procesados algorítmicamente, es por esto que como parte la obra se mezcla el oscilador y se aplica en el bajo relieve en tiempo real como performance. Esto como influencia de compartir los procesos de creación con el público a partir del Live Coding que es una línea muy importante de trabajo de creación del autor, así como la mezcla de epistemologías entre el arte y la ciencia, los objetos de un laboratorio como objetos artísticos y la performatividad del trabajo en laboratorio como experiencia sensible.



Fig. 75 Registro del acto performativo de activación del oscilador químico.



Fig. 76 Registro del acto performativo de activación del oscilador químico.



Fig. 77 Registro del acto performativo de activación del oscilador químico.



Fig. 78 Registro del acto performativo de activación del oscilador químico.

3.3.4 Todos los Relojes del Mundo

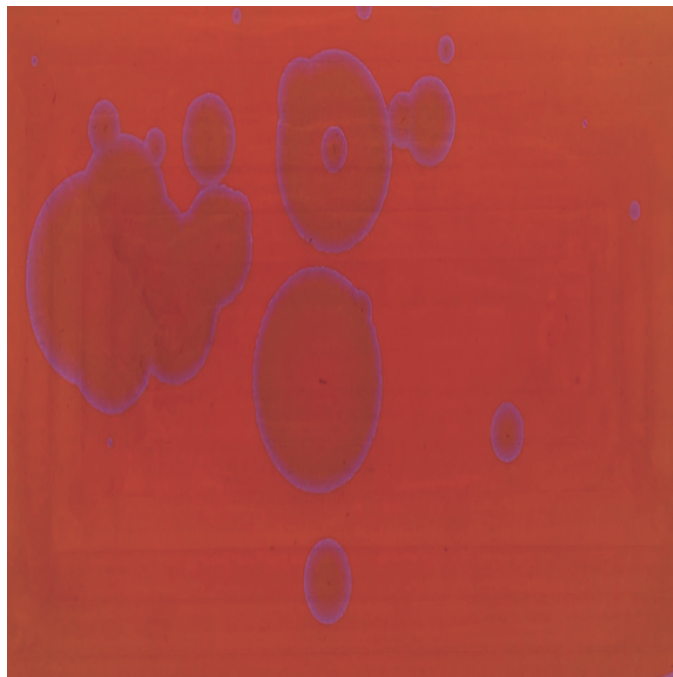


Fig. 79 Still del video del oscilador químico en el formato de análisis de esta sonificación científica de datos.

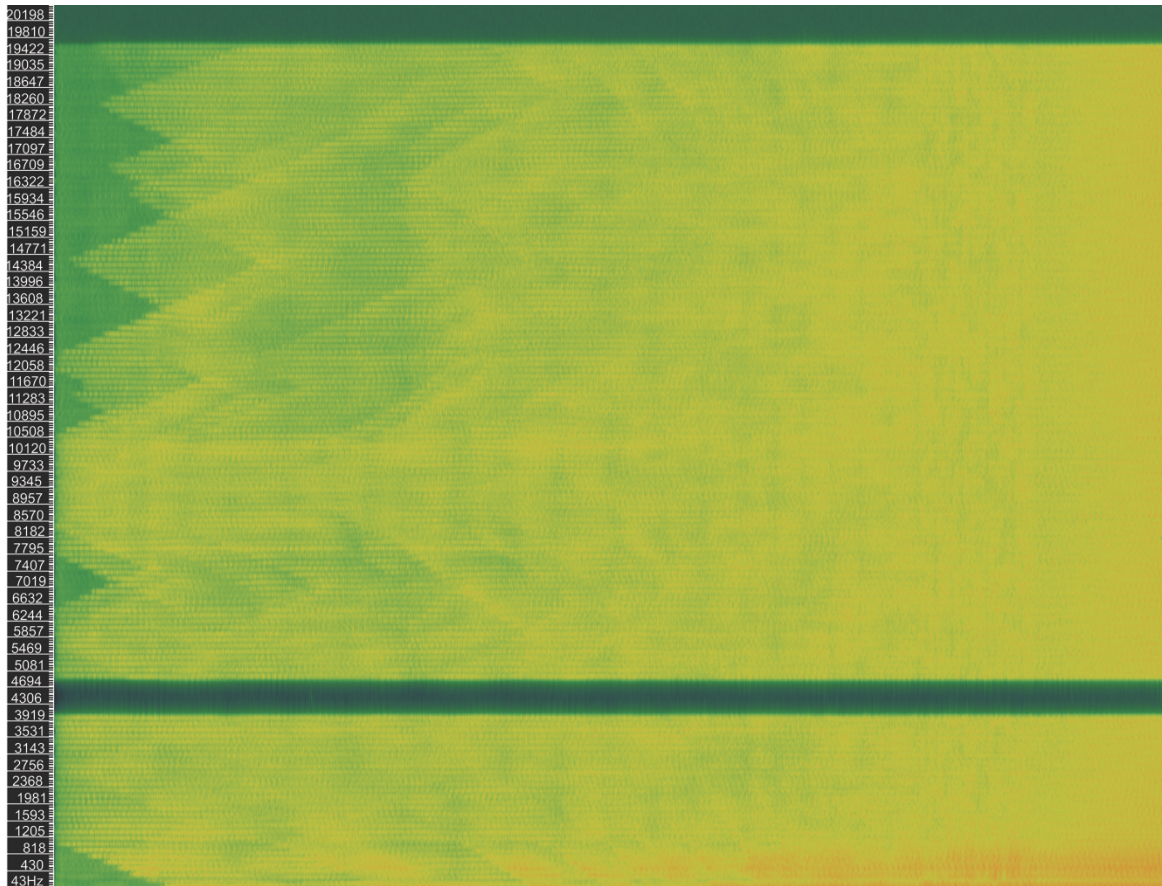


Fig. 80 Espectrograma de la sonificación científica de datos.

Esta es una sonificación científica de datos, es un mapeo isomórfico de los datos a sonido como fue explicado en el apartado anterior, con la diferencia de que esta sonificación del modelo de ruido BZL es de 19,600 osciladores independientes. Se tomó la información pixel por pixel de un video modificado para ser cuadrado de 140 x 140 píxeles. Se puede apreciar el nivel de aspereza de las armonías con este nivel de densidad y la mezcla es binaural.

El video puede ser consultado en <https://vimeo.com/520670440>

3.3.5 Secuenciador BZ

Siguiendo con la agenda de experimentar con sistemas dinámicos no lineales para generar herramientas y estrategias compositivas se creó un secuenciador. El ejemplo anterior (la sonificación Todos los Relojes del Mundo) es ya de por sí un secuenciador, pero si uno baja la densidad de puntos a sonificar y dispara eventos

de manera discreta en lugar de continua tenemos una herramienta más parecida a un secuenciador más tradicional ¿Cómo funciona?

En primer lugar, se implementó una simulación del oscilador bz en el lenguaje de programación Processing. Y después, se colocaron siete punteros en el plano de manera aleatoria, la manera en la que funcionan estos disparadores de eventos es la siguiente, el fondo de la implementación es negro y los frentes de onda tiene un color turquesa para generar un alto contraste y nula difuminación entre el fondo y el frente, se hace un comparativo del color en el cuadro último y el penúltimo, de tal manera que si el anterior es negro y el último turquesa se activa un disparador, que en este caso es una nota. (Fig. 81).

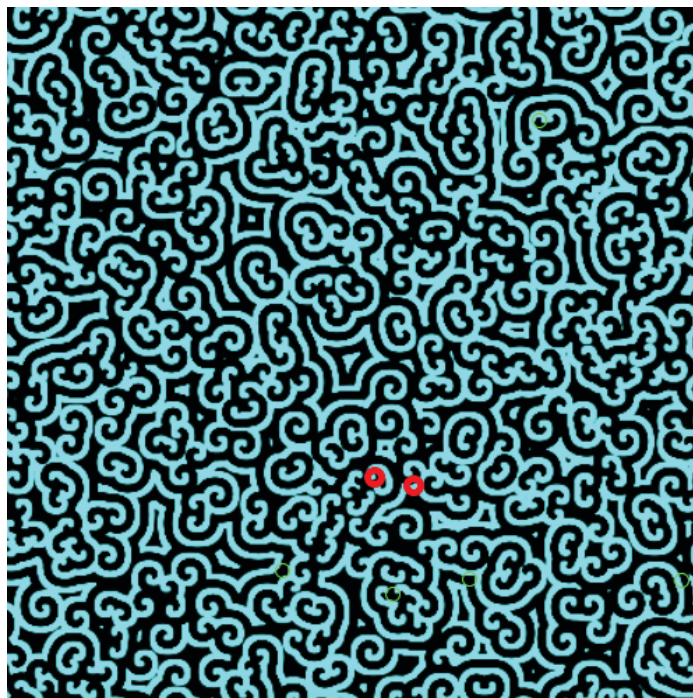


Fig. 81 secuenciador BZ, en esta imagen podemos apreciar que 2 de los 7 disparadores están activados por estar sobre una zona de frente de onda, los demás representados por círculos verdes están en zonas negras.

Para poder darle más posibilidades composicionales a este sistema, se le han añadido algunas funcionalidades que podemos ver en la siguiente imagen. Fig. 82.

- a) Zoom. Se puede hacer un acercamiento del mapa del oscilador si el *slider* 2D esta en la esquina inferior derecha se tendrá la imagen al 100% de tamaño y conforme nos acerquemos a la esquina superior izquierda el acercamiento será de hasta el 1% y el oscilador tendrá el comportamiento de oscilador en gotículas.
- b) Número de disparadores. Los botones nos permitirán tener 1, 2, 3 o 7 disparadores activados en el secuenciador.
- c) Número MIDI. Se puede seleccionar la fundamental de la nota que sonará cuando se active el disparador.
- d) Modo de edición. Se puede arrastrar el disparador con el mouse hasta ponerlo en una ubicación específica en el plano.
- e) Modo aleatorio. Se puede seleccionar una nueva posición para todos los disparadores de manera aleatoria y discreta.
- f) ResetBZ. Se puede reiniciar el oscilador a su etapa primaria en cualquier momento para encontrar nuevas secuencias, aunque los disparadores estén en la misma coordenada.

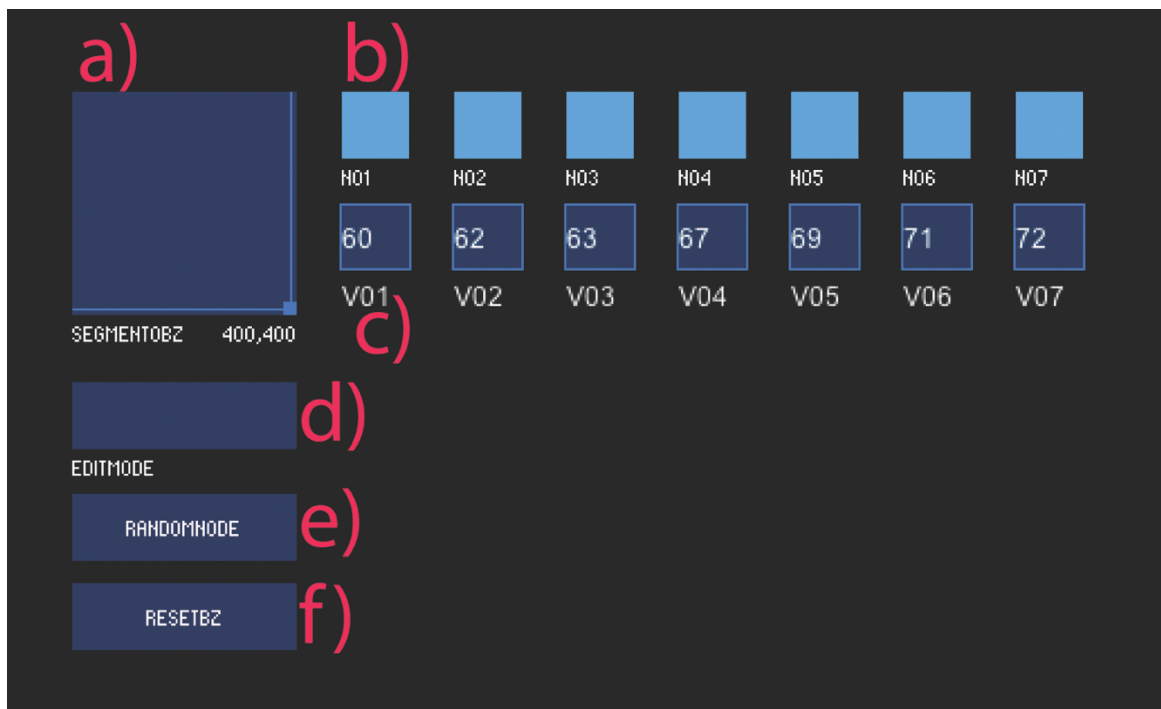


Fig. 82 Interfaz gráfica de usuario para controlar las funcionalidades del secuenciador BZ.

Al ser esta herramienta un desarrollo abierto programado sobre el lenguaje *open source* de Processing se puede acceder al código fuente y agregársele todas las funcionalidades que se deseen. Su sistema de comunicación permite la conexión con sintetizadores de tres maneras, protocolo serial (para conectarlo a plataformas como arduino y así conectarlo directamente a sintetizadores modulares y análogos), protocolo MIDI (que permite conectarlo a cualquier DAW digital de software libre privativo o a sintetizadores que cuenten con el puerto midi) y protocolo OSC (para conectarlo a lenguajes como supercollider, PureData o mandar la información telemáticamente a otros lugares del mundo a través de la red).

3.3.5.1 Hacia una teoría general de los secuenciadores

Bajo el paradigma occidental musical organizado por la partitura/pentagrama, el ritmo tiene varias capas, y la notación desarrollada para expresarlo intenta relacionar el paso del tiempo absoluto³⁵ con la articulación de los eventos del texto sonoro.

La primera capa es el pulso, una especie de rejilla que sienta una referencia entre la articulación rítmica con el tiempo absoluto, además es una interfaz de comunicación entre los músicos cuando tocan en grupo³⁶. Este está representado por la indicación del tempo: un valor base igual a un número en BPM (*Beats Per Minute*). Es como una telaraña en donde estarán posadas las notas que articularán el ritmo de nuestra obra.

³⁵ Tiempo absoluto desde una perspectiva de la física clásica. Los fenómenos de la psicoacústica que alargan y estrechan nuestra fenomenología del tiempo, como lo expresa Karheinz Stockhausen en su texto *Structure and Experiential Time*, no los tomaremos en cuenta por el momento. (Stokhausen, 1958)

³⁶ Una manera de medir la complejidad del ritmo en una obra es, por una parte, qué tanto se parece al pulso, y por otro, qué tan regulares son sus ciclos de repetición. Y aún en la obra más compleja, es decir, con un perfil de cambio en figuras rítmicas denso, poca regularidad, modulaciones métricas y poliritmos, los músicos de un ensamble nunca pierden la referencia del pulso dentro de ellos, así como lo hacen los protocolos de sincronización en la red de internet.

La siguiente capa es el compás. Este se refiere a la manera en que los pulsos serán acentuados para lograr cierto tipo de regularidad, es decir el compás de dos acentúa una nota sí y otra no, el compás de tres una nota sí y dos no, etc.

Y, por último, el perfil rítmico. Este se refiere a la variabilidad de figuras rítmicas en una frase musical, así como a la manera de agruparlas para acercarse o alejarse de la regularidad propuesta por el compás.

La mayoría del trabajo teórico en torno al ritmo se refiere a la densidad de cambio en figuras rítmicas y sus valores, pero esta propuesta formal intenta conceptualizar dos cosas diferentes:

- La rejilla que supone el pulso como espacio elástico para transformarla de manera topológica.
- La representación del paso del tiempo en esa rejilla y su descripción formal en varias dimensiones y como funciones lineales, no lineales y aleatorias.

Como ya hemos mencionado con anterioridad la música tiene una relación profunda con la secuencialidad como función del tiempo absoluto, y por lo tanto con el desarrollo de herramientas para hacer secuencias. Esta, es una tradición milenaria, que no comienza con la música electrónica, pero es en su seno donde ha encontrado su punto más álgido.

Es en las notaciones gráficas de todo el mundo en donde se comienza a plasmar la relación entre el tiempo absoluto y las articulaciones temporales de la música, pero nos centraremos en las máquinas que reproducen las secuencias y no en el fenómeno rítmico *per se*. Es decir, un software de notación de partituras como lo es Sibelius sí es un secuenciador, pero un humano interpretando una partitura no lo es.

Retomando el desarrollo de los autómatas que hubo en la Grecia clásica, los hermanos Banū Mūsā crean en el primer instrumento musical que se toca solo de

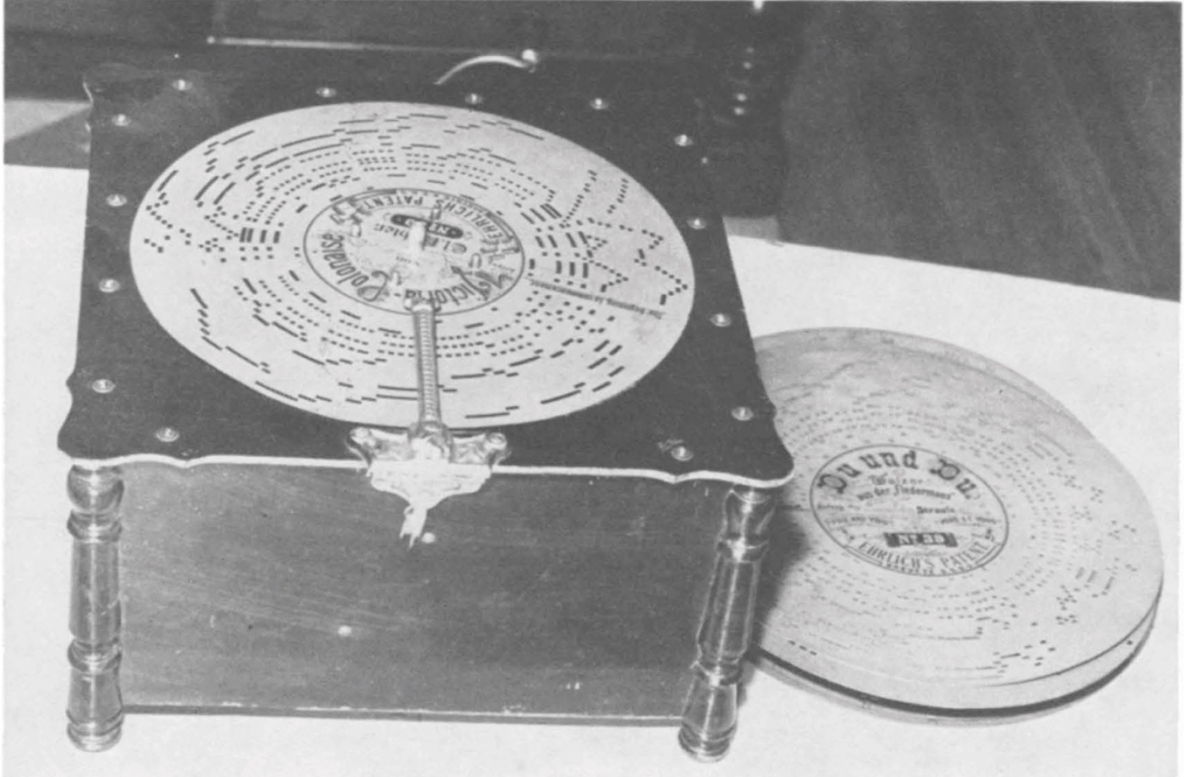


Fig. 84 Caja de música inventada por Brach-hausen en 1897 en donde aparece el disco perforado por primera vez.

Es en estos inventos, pre-electricidad, en los que encontramos los dos paradigmas más importantes de los secuenciadores lineales: el secuenciador lineal cartesiano y el secuenciador lineal polar. En ambos casos podemos hacer una comparativa similar a la sonificación de datos de alta densidad (Todos los Relojes del Mundo) y a la de baja (el Secuenciador BZ). El órgano hidráulico y las cajas de música con discos perforados son secuenciadores de baja densidad por lo que disparan eventos musicales, mientras que el primer cilindro donde se grabó música en el fonógrafo (Fig. 85) y el disco del gramófono (Fig. 86) son secuenciadores de alta densidad por lo que reconstruyen una señal.

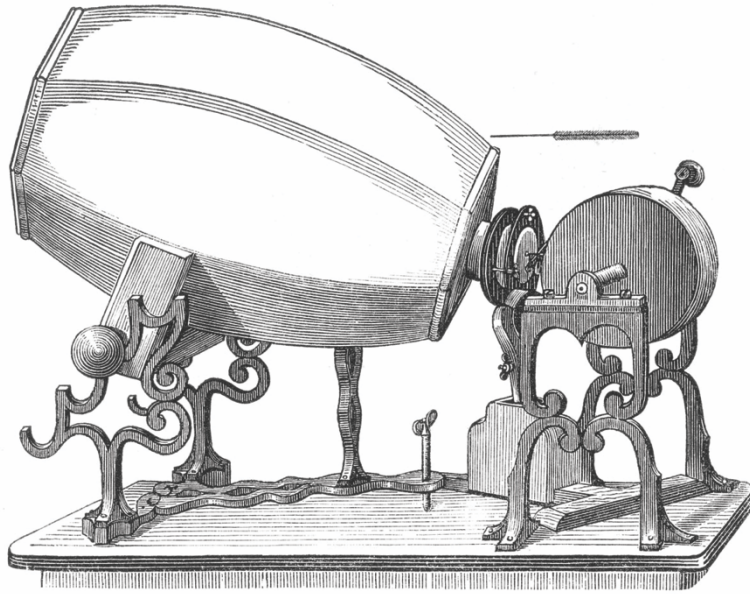


Fig. 85 primer aparato de grabación de la historia, el fonógrafo.



Fig. 86 Primer reproductor de sonido con formato disco, el gramófono.

Ya en el mundo de la música electrónica los dos ejemplos de secuenciadores lineales fueron “La Pared de Sonido” (Fig. 87) de Raymond Scott a mediados de los 40’s paradigma cartesiano y “El Ritmicón” (Fig. 88) creado entre Henry Cowell y León Theremin en 1931 paradigma polar. (Arar y Kapur, 2013)

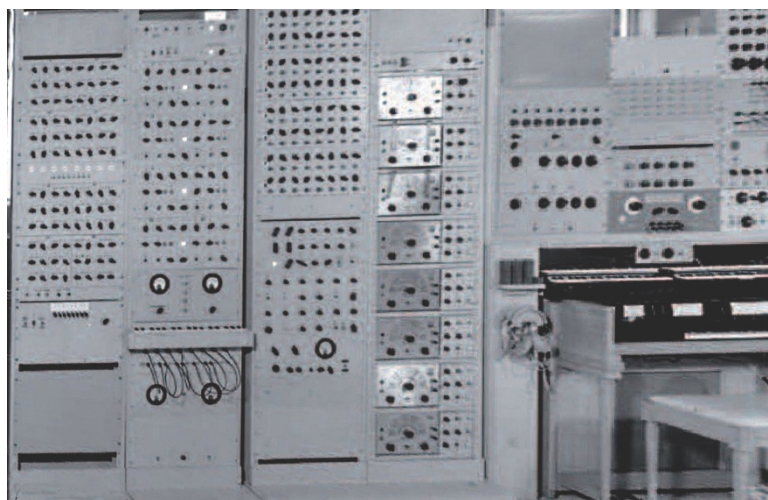


Fig. 87 Pared de Sonido de Raymond Scott.

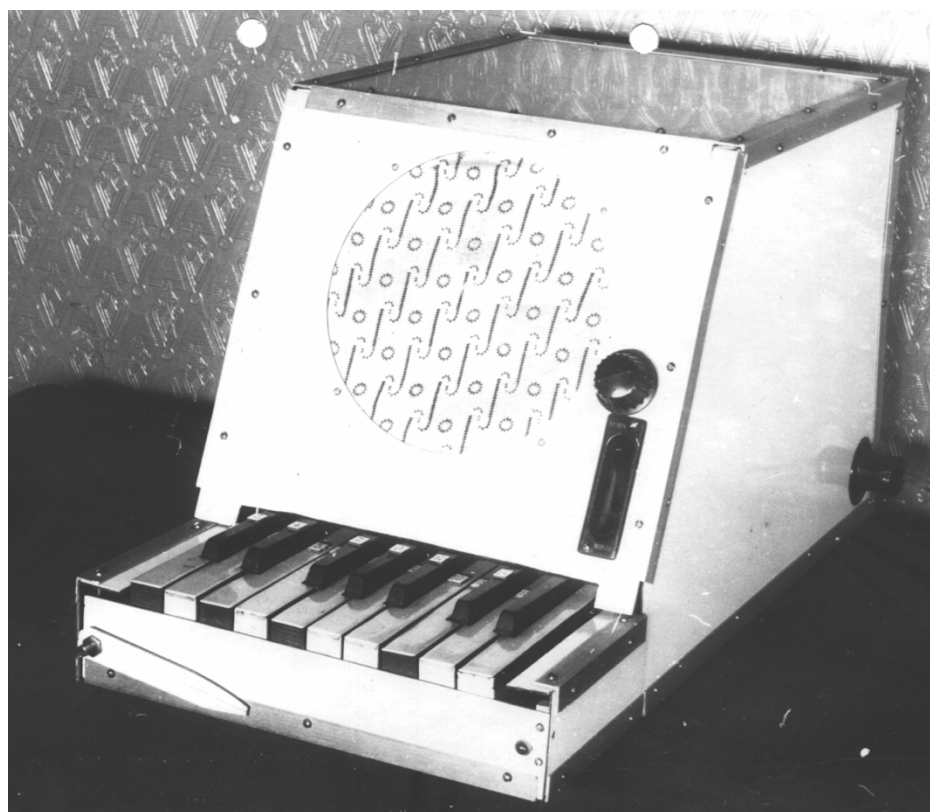


Fig. 88 Ritmicón de Cowell y Theremin.

Los aparatos electrónicos se fueron refinando, pero siempre estuvieron ligados a concepciones de la música mucho más tradicionales en cuestión de complejidad a diferencia del paradigma Cowell, que después devendría en la obra para Pianolas de Conlon Nancarrow. Los secuenciadores lineales cartesianos generaban un pulso constante y generaban 1 nota por pulso o múltiplos de 2, a diferencia del Ritmicón que pensaba en un ciclo y dividía ese ciclo en maneras irregulares de 1 nota por ciclo hasta 16 pasando por los todos los números enteros. Nancarrow introduce los acelerandos y ritardandos, los primeros acercamientos no lineales en un secuenciador, a pesar de que la velocidad del rollo era constante es decir lineal, pero al no tener en mente una división musical pudo evadir la linealidad del medio de reproducción.

Del lado totalmente contrario llegó la noción de secuenciador estocástico con el trabajo del compositor Iannis Xenakis y su síntesis granular, que fue una implementación de su pensamiento no determinista.

Por último, con la llegada de los lenguajes de programación y las computadoras personales al mundo de la creación sonora ha sido posible implementar diversos tipos de funciones en los secuenciadores (ecuaciones diferenciales) y con ellas el mundo de los secuenciadores no lineales que se encuentran entre el determinismo y el indeterminismo, por ejemplo, los sistemas de ecuaciones del oscilador BZ como estrategia de secuenciación, u otros sistemas de biocómputo como los desarrollados por el pionero de la aplicación de los biocómputos a la creación sonora Eduardo Reck Miranda (Miranda y Braund, 2016).

Entonces se propone una taxonomía formal de los secuenciadores en función a cómo se representa el paso del tiempo en el plano, no a su interface, ni tampoco a las ideas musicales que se pueden elaborar, porque como ya vimos con la obra de Nancarrow, pueden superarse.

-Secuenciadores lineales cartesianos.

$$x(t) = at + b$$

-Secuenciadores lineales polares

$$\theta = ct$$

-Secuenciadores random cartesianos

$$x(t) = f(t) + b$$

-Secuenciadores random polares

$$\theta = f(t)$$

$x(t)$ tal que para cada $f(t)$ es una variable aleatoria que se distribuye de acuerdo a cierta distribución de probabilidad ya sea discreta o continua.

-Secuenciadores no lineales

Accelerando

$$x(t) = t^2$$

-Secuenciadores no lineales - ecuaciones diferenciales.

$$\begin{aligned}\frac{\partial x}{\partial t} &= A - (B + 1)x + x^2y + D_1 \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2}, \\ \frac{\partial y}{\partial t} &= Bx - x^2y + D_2 \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2},\end{aligned}$$

Este tipo de secuenciadores tiene la posibilidad de ser determinista o estocástico si introducimos una perturbación aleatoria y la incrementamos o disminuimos. Un ejemplo más clásico de esta cualidad son los algoritmos humanizantes de softwares como Sibelius que permiten un nivel de imprecisión a la hora de reproducir el ritmo para que no suene tan maquínico, esta variable de *swing* pudiera ser exagerada estadísticamente para lograr la sensación de indeterminismo.

-Estrategias de *morphing*:

- Conversión de sistemas de coordenadas. Por ejemplo, convertir las coordenadas cartesianas a polares y viceversa.
- Composición de funciones. Por ejemplo, entre una función lineal y una cuadrática para introducir no linealidad a funciones lineales.
- Cambios topológicos al plano. Por ejemplo, convertir un plano de dos dimensiones extendido en un cilindro o simplemente arrugarlo.

La intención de elaborar herramientas formales para el estudio de los secuenciadores persigue varios objetivos: el primero es análisis, poder hacer una taxonomía de los distintos tipos de secuenciador permitirá poder escoger el mejor en cada caso y nos ayudará también a entender la producción artística generando contexto que enriquezca los discursos. El segundo es para la creación artística, generar más perspectivas diferentes sobre el mismo fenómeno siempre ofrece a los creadores mejores condiciones iniciales para su imaginación y estrategias mejor consolidadas para concretar proyectos que emergen de su imaginario. El tercer objetivo es para la innovación, desarrollar investigación original produce un ecosistema mucho más saludable para la independencia conceptual y tecnológica de una comunidad. Y el último es para poder crear herramientas que aumenten la expresividad de interpretación musical cuando se usan secuenciadores, complejizar el diseño de sintetizadores no lineales y estocásticos permitirá al intérprete de electrónica tener un diálogo con su herramienta misma, no solo ser un activador de procesos o un usuario de un software sino un agente dialéctico que se convierta en un investigador de los sistemas complejos, un jinete de los sistemas, un poeta.

4. Conclusión.

Quisiera empezar este capítulo con una cita textual de Eduardo Reck Miranda:

“Las computadoras han sido programadas para generar música desde principios de la década de 1950. Hoy en día, son omnipresentes en muchos aspectos de la música, desde el software para la composición y producción musical hasta los sistemas para la distribución de música a través de Internet. Por lo tanto, es probable que los desarrollos futuros en tecnología informática continúen impactando en la industria de la música. El campo relativamente nuevo de la Computación no convencional no es una excepción.

Mi investigación está investigando el desarrollo de nuevos enfoques para la composición musical con computadoras. Estoy particularmente interesado en establecer formas en las que las computadoras pueden ayudar a la creatividad... En términos generales, las computadoras han ayudado a mi creatividad al generar materiales musicales automáticamente para mis piezas, que yo no habría producido por mi cuenta manualmente. Estos materiales incluyen riffs, secuencias, ritmos, melodías, secciones enteras que duran varios minutos y, de hecho, sonidos sintetizados.

Técnicamente, existen dos enfoques para diseñar sistemas informáticos para generar música, a los que me refiero como la Inteligencia Artificial (IA) y los enfoques algorítmicos, respectivamente. El enfoque de la IA se ocupa de incorporar al sistema el conocimiento musical para guiar el proceso generativo. Por ejemplo, las computadoras se han programado con reglas de práctica común para el contrapunto y la voz con el fin de generar música polifónica. De hecho, las tecnologías de aprendizaje automático han permitido que las computadoras aprendan reglas musicales automáticamente a partir de partituras musicales determinadas, que posteriormente se utilizan para generar música. El enfoque algorítmico se ocupa de traducir datos generados a partir de modelos aparentemente no musicales en música. Abundan los ejemplos de este enfoque, incluidas las computadoras que han sido programadas para generar música a partir de funciones caóticas, fractales y autómatas celulares.

Estéticamente, el enfoque algorítmico tiende a generar música muy novedosa e inusual, mientras que el enfoque de IA tiende a generar imitaciones de ciertos tipos de música. Ambos enfoques tienen sus propios méritos y dificultades. Sin embargo, es importante incluir en esta discusión cómo los compositores utilizan materiales generados por computadora en su trabajo. Una vez más, sugiero dos enfoques aquí, a los que me refiero como enfoques puristas y utilitarios, respectivamente.

El enfoque purista de la música generada por computadora tiende a preocuparse más por la correcta aplicación de las reglas programadas en el sistema, que por los resultados musicales per se. En este caso, la salida de la computadora tiende a considerarse como la composición final. Es decir, el compositor normalmente no modificaría la música en este caso, ya que esto interferiría con la integridad del modelo o sistema. En el otro extremo del espectro está el enfoque utilitario, adoptado por aquellos compositores que consideran la salida de la computadora como materia prima para el trabajo posterior. En este caso, los compositores normalmente ajustarían los resultados para que se ajustaran a sus preferencias estéticas, en la medida en que la salida del sistema ni siquiera sea reconocible en la composición final. Obviamente, existe una línea borrosa que divide estos dos enfoques, ya que las prácticas que combinan aspectos de ambos son comunes. Es importante reconocer estas diferentes prácticas en la música por computadora para ampliar nuestra apreciación del impacto antes mencionado de las tecnologías de la computación en la música.” (Miranda, 2014).

Cuando la cognición humana se topa con un fenómeno ocurre una gran colisión, una explosión, como dos fuerzas incontrolables se empiezan a mezclar y a compenetrar. Dependiendo de la novedad del problema es más o menos violento este choque, pero siempre, como producto de este encuentro surgen herramientas y en sus formas se encuentran labradas las interacciones de estas dos fuerzas. Sobre esto se trata el proyecto: la creación de esculturas, instalaciones y composiciones que den cuenta de este equilibrio ecológico de nuestra naturaleza y el entorno que nos rodea, las herramientas encajando en el universo. El ser humano, el Homo Faber, tiene una relación estrechísima con las herramientas que fabrica, incluso se podría decir que entre el cerebro y las herramientas hay un

proceso hermoso de *biofeedback*, el cerebro las crea y después aprender a dominarlas, ya con la maestría en su uso encuentra nuevos caminos para hacer las cosas, las mejora o incluso descubre nuevas perspectivas sobre el problema que quería resolver con ellas. Y durante este proceso potenciar la creatividad.

Justamente esta rama de la música se le ha llamado “creación asistida por computadoras”, con un énfasis en asistencia. Por su puesto que la imaginación no necesita de ninguna máquina para volar con libertad, de hecho, estoy en bastante desacuerdo en la declaración de que “la tecnología cambia paradigmas”, creo que es parcialmente verdad. Es más bien la cognición humana, la imaginación y la creatividad, al utilizar una nueva tecnología la que genera esos cambios. Sin embargo, la reflexión en torno a los conceptos, estrategias y herramientas siempre enriquece las búsquedas creativas y teóricas.

La investigación en cómputos no convencionales no se hace para remplazar las computadoras electrónicas que tanto usamos, sino para tener más posibilidades y herramientas para crear obras que puedan comunicar de maneras diferentes con el público. Así, tampoco se crean investigaciones interdisciplinarias en música para remplazar las tradiciones de las que se nutren, sino para desmontar conceptos que ya se dan por sentado como el de “computadora” o “secuenciador” que en general se les da un tratamiento de “nuevas tecnologías”, pero al generar este tipo de investigaciones podemos darnos cuenta que tienen más de mil años como concepto y de esta manera reformular sus enunciaciones para tender puentes que sigan comunicando a dos vías innovación con tradición.

En conclusión, puedo decir que el abordaje de las ciencias de la complejidad y la teoría del caos en la producción teórica de la composición ofrecen un enfoque que me ha permitido acercarme de una manera más fresca y emocionante con los rituales de la música académica y abren nuevas puertas al abordaje colectivo que quiero seguir incluyendo en mi producción artística.

A futuro...

El proyecto de cómputos de sustrato biológico seguirá su camino, en diferentes líneas de investigación.

- Seguir detallando de manera formal las posibilidades del lenguaje de programación geométrico desarrollado con los primeros chips químicos que se presentan en este trabajo.
- Una de las líneas más prometedoras es el desarrollo de chips para la investigación en cardiopatías. Como resultado de la asesoría recibida en el Laboratorio de Biofísica de la Facultad de Ciencias de la UNAM encontramos potencial para generar herramientas de estudio en problemas del corazón (entendiendo el tejido cardiaco como un sistema excitable. Al igual que el oscilador BZ) como alternativa al uso de tejido vivo de embriones de pollo que es usado en el laboratorio como parte de sus experimentos.
- Por otro lado, los chips ya han sido usados como material pedagógico para los alumnos de licenciatura en el Laboratorio de Biofísica y al final del semestre escriben un poster de investigación, se hará con el tiempo una recopilación de las reflexiones de los alumnos sobre los mismo y se generará un set nuevo que responda a las necesidades pedagógicas de la materia.
- El laboratorio de biología molecular desarrollado para el proyecto de chips genéticos sigue con sus puertas abiertas, apoyando a la comunidad mexicana en biohacking y bioarte organizando cursos, residencias, diplomados y exposiciones.
- El siguiente proyecto está siendo desarrollado en el Instituto Fisiología Celular de la UNAM en la división de neurociencias en donde se desarrollan chips que en su núcleo tienen cultivos de neuronas, bajo la tutela del Dr. Francisco Fernández de Miguel.

Bibliografía

- Adamatzky, A. (2013). Reaction-Diffusion Automata: Phenomenology, Localisations, Computation. En *Emergence, Complexity and Computation*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31078-2>
- Adamatzky, A. (2018). The dry history of liquid computers. arXiv:1811.09989. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/1811.09989>
- Adamatzky, A. (2019). Plant leaf computing. En *Biosystems*, 182, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2019.02.004>
- Adamatzky, A., Akl, S., Burgin, M., Calude et al. (2017). East-West paths to unconventional computing. En *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 131, 469–493. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2017.08.004>
- Adamatzky, A., y Costello, B. D. L. (2012). Reaction–Diffusion Computing. En *Handbook of Natural Computing*, (pp. 1897–1920). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92910-9_56
- Adamatzky, A., y Durand-Lose, J. (2012). Collision-Based Computing. En Rozenberg, G., Bäck, T. y Kok, J. (Eds.), *Handbook of Natural Computing* (pp. 1949–1978). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92910-9_58
- Aires, K. R. T., Santana, A. M., y Medeiros, A. A. D. (2008). Optical flow using color information. En *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing - SAC '08*. Fortaleza, Brasil. <https://doi.org/10.1145/1363686.1364064>

Arar, R., y Kapur, A. (2013). A History of Sequencers: Interfaces for Organizing Pattern-Based Music. En *Proceedings of the Sound and Music Computing Conference 2013*, SMC 2013, Stockholm, Suecia.

Austin, C. (15 de octubre de 2020). *Bioinformática*. National Human Genome Research Institute. Recuperado de <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Bioinformatica>

Austin, C. (30 de octubre de 2020). *Electroforesis*. National Human Genome Research Institute. Recuperado de <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Electroforesis>

Bak, P., Chen, K., y Tang, C. (1990). A forest-fire model and some thoughts on turbulence. En *Physics Letters A*, 147(5–6), 297–300. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(90\)90451-s](https://doi.org/10.1016/0375-9601(90)90451-s)

Bodine, M. (s/f). *Ingeniería Genética*. National Human Genome Research Institute. Recuperado de <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Ingenieria-genetica>

Calude, C. S. (2016). Unconventional Computing: A Brief Subjective History. En Adamatzky, A. (Ed.), *Emergence, Complexity and Computation*, 855–864. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33924-5_31

Currin, A., Korovin, K., Ababi, M., Roper, K., Kell, D. B., Day, P. J., y King, R. D. (2017). Computing exponentially faster: implementing a non-deterministic universal Turing machine using DNA. En *Journal of The Royal Society Interface*, 14(128), 20160990. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0990>

Daniel, R., Rubens, J. R., Sarpeshkar, R., & Lu, T. K. (2013). Synthetic analog computation in living cells. En *Nature*, 497(7451), 619–623. <https://doi.org/10.1038/nature12148>

Danino, T., Mondragón-Palomino, O., Tsimring, L. et al. (2010). A synchronized quorum of genetic clocks. En *Nature* 463, 326–330.

<https://doi.org/10.1038/nature08753>

Degn, H. (1967). Evidence of a Branched Chain Reaction in the Oscillating Reaction of Hydrogen Peroxide, Iodine and Iodate. En *Acta Chemica Scandinavica*. 21(4), 1057-1066.

Diehl, S., Hartel, P. y Sestof, P. (2000). Abstract machines for programming language implementation. En *Future Generation Computer Systems*. 16(2000) 739-751.

Elowitz, M. y Leibler, S. (2000). A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators. En *Nature* 403(20) 335-338.

Field, R., Körös, E. y Noyes, M. (1972). Oscillations in Chemical Systems. II. Thorough Analysis of Temporal Oscillation in the Bromate-Cerium-Malonic Acid System. En *Journal of the American Chemical Society*. 94(25), 8649-8664.

Fowler, C. B. (1967). The Museum of Music: A History of Mechanical Instruments. En *Music Educators Journal*, 54(2), 45–49. <https://doi.org/10.2307/3391092>

Fredkin, E., y Toffoli, T. (1982). Conservative logic. En *International Journal of Theoretical Physics*, 21(3–4), 219–253. <https://doi.org/10.1007/bf01857727>

García, E. (2013). *Fonología Semental y Sistema Tonal del Mazateco de Río Santiago, Huautla* (Tesis de Maestría). Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS).

González Redondo, F. A., Martín-Loeches, M. y Silván Pobes, E. (2010). Prehistoria de la matemática y mente moderna: pensamiento matemático y recursividad en el Paleolítico franco-cantábrico. En *Dynamis*, 30.
<https://doi.org/10.4321/s0211-95362010000100007>

Green, E. (s/f). *Plásmido*. National Human Genome Research Institute. Recuperado de <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Plasmido>
Hill, D. y Morgan, T. (2003). Pattern Formation and Wave Propagation in the Belousov-Zhabotinskii Reaction. Recuperado de https://neurophysics.ucsd.edu/courses/physics_173_273/bz_paper.PDF

Lach, J. (2012). Curvas de disonancia perceptual como fuentes generadoras para la composición y el estudio de la armonía. En *Perspectiva Interdisciplinaria en Música*, 5-6(2011-2012), 29-57.

Lothar Kuhnert, KI Agladze, y VI Krinsky. (1989). Image processing using light-sensitive chemical waves. En *Nature* 379:19.

Maldonado, C. y Gómez, N. (2010) *El mundo de las ciencias de la complejidad: Un estado del arte*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.

Miller, M. y Bassler, B. (2001). Quorum Sensing in Bacteria. En *Annual Review of Microbiology*, 55(1), 165–199.

Miranda, E. (2001). *Composing music with computers*. Oxford Boston: Focal Press.

Miranda, E. (2013). Harnessing the Intelligence of *Physarum Polycephalum* for Unconventional Computing-Aided Musical Composition. En *International Journal Of Unconventional Computing*. Vol. 10, (251-268).

Miranda, E. R., & Braund, E. (2016). Experiments in Musical Biocomputing: Towards New Kinds of Processors for Audio and Music. En Adamatzky, A. (Ed.), *Emergence, Complexity and Computation* (pp. 739–761). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33921-4_29

Miranda, E.R., Adamatzky, A. y Jones, J. (2011). Sounds synthesis with slime mould of *Physarum Polycephalum*. En *Journal of Bionic Engineering*, 8(2), 107–113. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(11\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(11)60016-4)

Moore, G.E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. En *Electronics*, 114-117. Reimpreso en: *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82–85 (1998).

Muñoz-Miranda, L. A. (2019). Breve Descripción de la Biología Sintética y la Importancia de su Relación con otras Disciplinas. En *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*. <https://doi.org/10.17488/rmib.40.1.9>

Nakagaki, T., Yamada, H. y Tóth, Á. (2000). Maze-solving by an amoeboid organism. En *Nature* 407, 470. <https://doi.org/10.1038/35035159>

Neuman, J. (15 de octubre de 2020). Recuperado de <https://web.archive.org/web/20130314123032/http://qss.stanford.edu/~godfrey/vonNeumann/vnedvac.pdf>

Ongan, S. (2008). The Economy Machine. En *The Journal of American Academy of Business*, 11(1).

Pokharel, M. (2020). *Computational Complexity Theory (P, NP, NP-Complete and NP-Hard Problems)*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/342335335_Computational_Complexity_Theory_PNPNP-Complete_and_NP-Hard_Problems

Prieto, D. Y Reyes, J. (17 de diciembre de 2020). *Fundamentos de Síntesis de Audio con Granos*. Recuperado de <https://ccrma.stanford.edu/~juanig/papers/granular.pdf>

Prindle, A., Samayoa, P., Razinkov, I., Danino, T., Tsimring, L. S., y Hasty, J. (2011). A sensing array of radically coupled genetic 'biopixels'. En *Nature*, 481(7379), 39–44. <https://doi.org/10.1038/nature10722>

Rozikov, U. (2013). What are p-Adic Numbers? What are They Used for? En *Asian Pacific Mathematics Newsletter* 3(4). Recuperado de https://www.asiapacific-mathnews.com/03/0304/0001_0006.pdf

Sánchez, F. (2006). Morfogénesis y emergencia de patrones en sistemas biológicos: del rompimiento de simetría a la autoorganización y la Excitabilidad. En Barajas, E., Mansilla, R., Rosado, J. & Barrios, L. (Eds.), *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica : ensayos y modelos*. (pp. 110-111). México, D.F.: Secretaría de Salud e Instituto de Física del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM Grama Editora.

Schönberg, A. (1989). *Fundamentos de la composición musical*. Madrid, España: Real Musical.

Schumann, A. y Pancers, K. (2016). *Physarum Machines. Selected Works*. Rzeszów: University of Information Technology and Management in Rzeszow.

Stokhausen, K. (1958). Structure and Experiential Time. En *Die Riehe*, Vol. 2, (64-75).

Tyson, J. (1973). Some further studies of nonlinear oscillations in chemical systems. En *The Journal of Chemical Physics*, 56(9) 3919-3930.

Vielma Hernández, J. D. (2017). Panorama de los estudios lingüísticos sobre el mazateco. En *Cuadernos de Lingüística de El Colegio de México*, 4(1), 211. <https://doi.org/10.24201/clecm.v4i1.56>

Wilson, J. (2007). Física. México, D.F: Pearson Educación.

Winfrey, A. (1984). The Prehistory of the Belousov-Zhabotinsky Oscillator. En *Journal of Chemical Education*. 61(8), 661-663.

Yokoi, H., Adamatzky, A., De Lacy Costello, B. y Melhuish, C. (2004). Excitable chemical medium controller for a Robotic hand. En *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 14(09), 3347–3354. <https://doi.org/10.1142/s0218127404011363>

Zhu, L., Kim, S.-J., Hara, M. y Aono, M. (2018). Remarkable problem-solving ability of unicellular amoeboid organism and its mechanism. En *Royal Society Open Science*, 5(12), 180396. <https://doi.org/10.1098/rsos.180396>

Anexo 1. Síntesis para el programa de mano

1.- Jazz Codes VIII.

Para cuarteto de jazz (Saxofón/Clarinete Bajo, guitarra eléctrica, contrabajo, batería) y live coder.

Circa. 15'.

2.- Tzompantli.

Dispositivo multimedia reactivo, para ensamble de cámara (flauta en do/piccolo, clarinete bajo, violín, viola, cello, contrabajo) y electrónica en tiempo real.

13'.

3.- K'usi avo'onton.

Acción colectiva con el público, coro mixto y electrónica en tiempo real.

Circa 30'.

4.- Autorretrato, óleo sobre tela.

Piano metamorfoseador de Julián Carrillo en 11vos de tono.

7' 29".