



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN MÚSICA
TECNOLOGÍA MUSICAL

IRRUPTIO: UNA APROXIMACION TRANSDISCIPLINARIA A LAS INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA

TESINA
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA MUSICAL

PRESENTA:
JESÚS GÓMEZ GARCÍA

TUTOR:
DR. ENRIQUE OCTAVIO FLORES GUTIÉRREZ
FACULTAD DE MÚSICA UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO, 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE GENERAL

Índice General.....	2
1. Resumen.....	3
2. Prefacio.....	5
3. Introducción.....	8
4. Antecedentes y Estado del Arte	16
4.1 Aspectos históricos y teóricos del Electroencefalograma.....	16
4.2 Historia del arte con señales biológicas.....	24
4.2.1 Etapa analógica (1960 - 1980)	25
4.2.2 Etapa digital (1989 - actualidad).....	33
5. Irruptio: una aproximación transdisciplinaria a las interfaces cerebro-computadora	46
5.1 Metodología.....	46
5.2 Resultados.....	54
6. Discusión.....	64
7. Bibliografía.....	68

1. RESUMEN

La síntesis y el procesamiento digital de sonido e imágenes se han convertido en parte importante del proceso creativo, no solo en la música, sino del arte en general. Sin embargo, el control y la expresividad con estas herramientas siguen siendo un reto para el compositor e intérprete de música electroacústica o experimental. El presente trabajo teórico-práctico analiza el performance transdisciplinario *Irruptio*, que es la culminación de los procesos de investigación y desarrollo tecnológico durante mis estudios en la Maestría en Tecnología Musical. El proyecto surge primordialmente por mi interés en utilizar la señal del electroencefalograma y sus diferentes bandas de frecuencias, así como algunas funciones cognitivas -como control de parámetros computacionales- para modificar en tiempo real una interpretación musical. Estéticamente, se suscribe dentro de una visión *hacker* de la tecnología; buscamos utilizar las señales obtenidas fuera de la perspectiva diagnóstica, con dispositivos ajenos a la experimentación sonora y escénica. Asimismo, desde una perspectiva simbólica, representa la problemática en la relación humano-máquina y la complejidad de las relaciones interpersonales cuando son mediadas por la tecnología digital. Paradójicamente, es una crítica y una reflexión sobre el papel de la tecnología en las artes y cómo irrumpe (de ahí el nombre de la obra) en el proceso creativo.

Irruptio fue creada de forma colectiva en el transcurso de la primera edición del *MusicMakers Hacklab*¹ en su primera edición en México. El objetivo fue el de usar el *Neurofeedback* como vía de control de parámetros en tiempo real en una obra escénica transdisciplinaria, utilizando una interface cerebro-computadora compleja, en la que intervendrían dos usuarios: una intérprete de violonchelo y una bailarina.

Los resultados de esta investigación constan de archivos sonoros y multimedia, así como una explicación detallada en la metodología y los procesos tecnológicos utilizados incluyendo la programación en *software* libre (*processing* y *pure data*), los cuales están disponibles a través de los siguientes portales:

<https://subcorticalmedia.wordpress.com/irruptio/>

<https://github.com/subcorticalmedia/Neurosky-Music>

<https://soundcloud.com/subcortical-1/sets/neurofeedack-music>

En la discusión abordamos cuales de los objetivos teóricos y prácticos fueron completados, en particular en lo referente a la relación con los tres autores en los cuales se basa el diseño de la obra: Alvin Lucier, Manfred L. Eaton y David Rosenboom. De igual manera, se analiza cómo el performance aborda la problemática del control, no solo en la creación artística, sino en las relaciones sociales y personales cuando intervienen procesos tecnológicos.

¹ El *Music Makers Hacklab* se desarrolló en forma de laboratorio colaborativo en Marzo del 2015. Después de una semana de trabajo, los participantes del laboratorio *Máquinas que sintonizan* presentaron los proyectos resultantes de sus colaboraciones en el Laboratorio Arte Alameda.

2. PREFACIO

“La música electrónica no es intrínsecamente humana o inhumana; tampoco lo son las computadoras, osciladores ni ninguna otra máquina. Simplemente son usadas en formas humanas o inhumanas”.

Manford L. Eaton – *Electronic Music Generation Systems* (1969)

Nací en la ciudad de Villahermosa durante el *boom* petrolero de los años setenta, años decisivos en la urbanización de esta capital de Tabasco. Mis padres son médicos, y por lo tanto crecí inmerso en el idioma de la medicina, la radiología y el diagnóstico por imágenes. Gracias al trabajo de mi padre viví muy de cerca el nacimiento del diagnóstico por imágenes y la llegada del primer tomógrafo al estado en 1981 y mas tarde de la resonancia magnética.

Si bien el tener un contacto temprano con la medicina y el avance tecnológico dentro del área, tuvo un impacto en mi formación temprana. Mis aptitudes e intereses por las humanidades y las ciencias sociales me inclinaron a estudiar la carrera de Psicología, interesándome particularmente en la Neurociencia² y los procesos cognoscitivos. De manera paralela, el interés en el sonido y la música surgieron desde temprana edad. La Tecnología Musical pronto se mostró como un área a desarrollar,

² Campo de la ciencia que estudia el Sistema nervioso y todos sus aspectos; su estructura, funciones, desarrollo ontogenético y filogénético, bioquímica, farmacología y patología; y de cómo sus diferentes elementos interactúan, dando lugar a las bases biológicas de la cognición y la conducta.

primero gracias a la accesibilidad de las grabaciones en cinta magnética y posteriormente con la popularización de la computadora personal como sistemas de producción musical digitales y las interfaces de Audio y MIDI, con las cuales di mis primeros pasos en la producción musical a finales de los años noventas y principios del 2000.

Hacia el final de la carrera universitaria me surgió el interés de vincular la práctica de la psicología con la música y la tecnología. Mi tesis de licenciatura titulada: *Efectos en el electroencefalograma de la música tribal percusiva y la música electrónica* (Gómez García, 2003) constituyó el primer intento por explorar los cruces entre los procesos neurofisiológicos, el sonido y la música. En esta ocasión mi enfoque estaría más ligado a un método científico que al quehacer artístico. En 2008, después de trabajar varios años en Psicología Clínica me mudé a la Ciudad de México (entonces Distrito Federal) para estudiar una especialidad en Musicoterapia en el Instituto Mexicano de Musicoterapia Humanista (IMMH). Esta formación como musicoterapeuta me sensibilizó aún más sobre los procesos sonoros y su relación con los estados mentales y emocionales. Es al final de dicha formación en que surge la inquietud de utilizar algunos procesos mentales como la atención, para generar sonido en tiempo real a través de sistemas digitales de síntesis y procesamiento. Gracias a la realización de mi servicio social de dicha especialidad en el Instituto Nacional de Psiquiatría “Ramón de la Fuente”, bajo la tutela del Dr. Enrique Octavio Flores Gutiérrez, me di cuenta que existían las herramientas y los antecedentes para emprender un proyecto de trabajo para la generación de sonido utilizando señales provenientes de la actividad eléctrica cerebral.

Conocía ciertos sistemas que en ese momento utilizaban *Neurofeedback*³ e interfaces cerebro-computadora para generar sistemas complejos de armonía e incluso música generativa (que permite crear estructura, notas y otros elementos sonoros); también conocía el trabajo de músicos e investigadores como Alvin Lucier y David Rosenboom con *Neurofeedback* para producir estupendas obras de arte sonoro. Sin embargo, no fui capaz de encontrar un documento que recopilase los diferentes aspectos de esta disciplina y que sirviese al mismo tiempo como una guía teórico-práctica para crear instrumentos digitales en *software* utilizando *Neurofeedback* y que, además, fuera dirigido a un público no especializado. De igual manera, me interesaba crear y adaptar herramientas que estuviesen al alcance de cualquier persona, no exclusivamente dentro de un laboratorio médico o de investigación, ya que uno de mis propósitos es integrar estos conocimientos en un entorno de creación musical y artística contemporáneos.

Mi interés por la psicoacústica y la música así como mi formación como psicólogo y musicoterapeuta me han llevado a buscar y utilizar procesos cognitivos como la atención y la meditación, que, en conjunto con el *Neurofeedback*, posibilitan el control del timbre en tiempo real, un tema que al momento del planteamiento de este trabajo no había sido objeto de estudio, por lo que se dio inicio este proyecto con esa finalidad.

³ También llamado retroalimentación electroencefalografía, es un tratamiento neurocomportamental destinado a la adquisición de autocontrol sobre determinados patrones de actividad cerebral y la aplicación de estas habilidades en las actividades de la vida diaria.

3. INTRODUCCION

La disponibilidad de equipos de EEG⁴ ha aumentado drásticamente durante la última década y si bien la mayoría de dichos equipos no son adecuados para un uso diagnóstico⁵, si han servido para acercar al público a las interfaces cerebro-computadora. Equipos como el *Neurosky Mindwave*⁶, *EPOC Emotiv* y la plataforma abierta *OpenEEG*, han abierto la puerta para la experimentación de diversos tipos y usos, entre los que podemos destacar el entretenimiento, la interactividad en las artes y los videojuegos, así como ayudar a personas con capacidades diferentes a tener una presencia mas activa en el mundo digital. (Plass-Oude Bos, D., Reuderink, B., Laar, B., Gurkok, H., Mühl, C., Poel, M. , 2010) & (Goldberg, Avi, 2012).

El presente trabajo busca explorar el impacto que dicha tecnología tiene en la creatividad, la música y el arte. El ser humano está cada vez mas integrado a un entorno digital, por lo que seguimos buscando nuevas y mejores formas para interactuar con las máquinas y con las computadoras digitales. Las generaciones actuales que hemos crecido a la par de la tecnología digital, parecemos tener una necesidad de integrarnos cada vez más con esta realidad. Esto se refleja en la popularidad de la realidad virtual, la realidad aumentada y las interfaces humano-computadora. Todos estos

⁴ EEG son las siglas de Electroencefalograma, técnica utilizada para hacer un registro de la energía electromagnética proveniente de la corteza cerebral.

⁵ Estos productos buscan ser de bajo costo y fácil operación, por lo que no cuentan con las especificaciones necesarias para un uso médico. Su público es el de entusiastas de la tecnología y personas con interés en utilizar el *Neurofeedback* en sus propios proyectos.

⁶ *Neurosky* es una compañía que fabrica y distribuye sensores biológicos con el objetivo de llegar a un mercado mundial, con aplicaciones que van desde la salud hasta los videojuegos. (<http://neurosky.com/>)

elementos pueden ser vistos como una manera de buscar una actualización a nuestra condición humana.

El Transhumanismo⁷ y la Tecnopsicología⁸ son perspectivas emergentes que estudian las relaciones que se establecen entre el hombre y su nuevo entorno digital. Comparten la visión de una transformación del ser humano, con miras a una integración total con la realidad digital. De igual manera, advierten sobre los riesgos de dicha aplicación de la tecnología como nuevas formas de control social. Estos procesos de manipulación ya están en marcha y forman parte de nuestra vida cotidiana (Kerkhove, 1999).

Nos dirigimos, a una velocidad vertiginosa, desde la tranquilizadora era del *hardware* hacia la desconcertante y espectral era del *software*, en la que el mundo que nos rodea está cada vez controlado por circuitos demasiado pequeños para ser vistos y códigos demasiado complejos para ser entendidos (Dery, Mark; en Sibila, 2005).

La tecnología digital, a diferencia de la analógica, tiende a actualizarse constantemente. Esto ha provocado cambios en los hábitos de consumo de los dispositivos tecnológicos. Los teléfonos inteligentes nos han dado la oportunidad/necesidad de estar siempre “en línea” y tienen la capacidad de reemplazar a la mayoría de nuestros otros dispositivos, desde una calculadora hasta un instrumento musical. Sin embargo, también constituyen mecanismos de control, en donde la geolocalización en tiempo real, la pérdida de la privacidad y la disponibilidad permanente, entre otras cosas, pueden ser percibidas como una amenaza a la libertad personal.

⁷ El transhumanismo propugna por un cambio de la esencia humana por medio de mejoramientos biotecnológicos, como un modo de acelerar el proceso evolutivo humano. (Velázquez Fernández, 2009).

⁸ La tecnopsicología es una forma de entender al ser humano que incluye a nuestras extensiones tecnológicas como parte del entorno. (Kerkhove, 1999).

Es importante considerar los estudios de Herminio Martins (Sibila, 2005), quien utiliza ciertos mitos para explicar las relaciones de poder entre los mecanismos de control de la tecnología y el ser humano, así como para cuestionar la obsolescencia del cuerpo humano en un marco evolutivo. “Herminio Martins recurre a dos figuras míticas de la cultura occidental, Fausto y Prometeo, para analizar las bases de nuestra tecno-ciencia. La tradición prometeica y la tradición fáustica” (Sibila, 2005). Con esta explicación metafórica, plantea a la tradición prometeica como una fuerza que busca transformar la naturaleza con el objetivo de un “bien común” y de ayudar al ejercicio de la libertad, la trascendencia del ser humano y la construcción de una sociedad racional. “Con una firme confianza en el progreso, los prometeicos ponen el acento en la ciencia como conocimiento puro y tienen una visión meramente instrumental de la técnica” (Sibila, 2005). La tradición fáustica es otra rama de la filosofía de la tecno-ciencia y tiene su origen en la filosofía de la técnica, con teóricos como Heidegger y Spengler; se oponen a la visión prometeica ya que consideran a la ciencia dependiente de la técnica. A diferencia de la ciencia, no buscan la verdad; restringen el conocimiento a la búsqueda de la predicción y el control. Podemos situar a la perspectiva fáustica como más cercana al uso actual de la tecnología digital y al capitalismo. Un ejemplo del uso tecnológico en ambas corrientes se observa en la técnica de la Electroencefalografía (EEG), en la que se pueden identificar inclinaciones hacia ambas tradiciones. Su uso como método de diagnóstico en trastornos como la epilepsia y otras patologías del Sistema Nervioso Central ha servido para la salud pública, mejorando la calidad de vida de la población, pero por otro lado también constituye un método de clasificación y control en psiquiatría. Posteriormente, se descubrió la aplicación del EEG como técnica para autorregular procesos que se consideraban fuera del control de la conciencia, llamado *Biofeedback* o más específicamente *Neurofeedback*. Esta aplicación de EEG permite trascender las limitaciones que se pensaban

impuestas por el Sistema Nervioso, teniendo claramente una inclinación a la tradición prometeica. Sin embargo es común el uso de bioseñales, incluido el EEG y el *Neurofeedback* como mecanismo de control (un ejemplo claro es el uso del polígrafo como método de selección de personal y pruebas de confianza).

Uno de los objetivos de esta investigación es plantear un método para utilizar la tecnología de EEG como señal de control en sistemas digitales para la síntesis y procesamiento de sonido, visuales interactivos y en el caso particular de *Irruptio*, el performance. Utilizaremos tecnología comercial con procesos de *hacking*⁹ y *software* libre y de código abierto, con la finalidad de que la información generada sea libre y fácilmente replicable.

El resultado final del proceso es la obra *Irruptio*, la cual fue creada de forma colaborativa en el marco de la primera edición del *MusikMakers Hacklab* en el 2015. Fue presentada en el Laboratorio Arte Alameda en su debut y se presentó por segunda ocasión en el Centro de Cultura Digital, con algunos cambios en su estructura. El colectivo formado específicamente para esta obra, tuvo un carácter estrictamente transdisciplinario; contó con participantes provenientes de diferentes áreas del conocimiento como la física, el diseño, la música, las artes escénicas y la psicología. El planteamiento desde el principio de la planeación del proyecto fue el de utilizar las ondas EEG para intervenir un *performance* en tiempo real. El objetivo central es analizar los procesos involucrados en la creación de una interface compleja, ya que involucra diversos componentes tecnológicos y humanos, con el fin de provocar en el público una introspección sobre la complejidad de las relaciones humanas cuando son

⁹ El término *hacking* o *hacker* se utiliza en un sentido más amplio. De acuerdo con Pekka Himannen un *hacker* es un experto o un entusiasta de cualquier tipo y puede o no tener que ver con la informática. En este trabajo se refiere a la intervención del *hardware* y del cuerpo humano.

mediadas por la tecnología digital. Como herramienta principal en este estudio se utilizó la señal digitalizada del Electroencefalograma para controlar aspectos de la síntesis y el procesamiento de sonido relacionados con el timbre, lo que a su vez me llevó a la creación de instrumentos virtuales cuyos parámetros son intervenidos por la señal proveniente del dispositivo EEG. Algunas bandas del espectro del EEG fueron utilizadas como las ondas alpha, beta y theta; así como también algunos procesos cognitivos como son la atención y la meditación. Esta señal digitalizada de la actividad eléctrica del cerebro que registran los electrodos a través del cráneo, fue utilizada para modular en tiempo real parámetros asignados arbitrariamente (por lo que no podría hablarse de una sonificación de las ondas cerebrales) en los sintetizadores y procesadores de audio virtuales. Esta asignación arbitraria se dio a través de “prueba y error”, buscando lograr una expresividad y cierto grado de control del timbre sintetizado usando únicamente las ondas cerebrales como moduladores. La señal es una representación digital de una representación analógica de la actividad cerebral. Nuestra propuesta experimental no se basa en encontrar evidencia con rigor científico o probar alguna hipótesis en particular. El objetivo fue explorar las posibilidades de expresión al usar este grado de control y en parte de aleatoriedad que brinda el uso del EEG como *Neurofeedback* sonoro, visual y mecánico-muscular.

Las investigaciones realizadas durante dos años, tanto metodológicas como tecnológicas, a distintas obras individuales y/o colectivas que involucran el uso del *Neurofeedback* como intervención a procesos interactivos en música y sonido, fue el principal objetivo de este proyecto. Gracias a la incorporación del aprendizaje obtenido durante los dos años de la maestría así como los procesos colaborativos transdisciplinarios –destacando una obra colectiva de *performance* electroacústico y

transdisciplinario que llevó a cabo en el *MusicMakers Hacklab DF*¹⁰ (2015)- es que la obra *Irruptio* pudo desarrollarse.



Figura 3.1 Álbum con las obras participantes de la convocatoria *MusicMakers Hacklab DF*

PARTICIPANTES

El equipo de trabajo se formó con cinco integrantes provenientes de distintos campos formativos y profesionales: música, física, danza, diseño y psicología. Quienes integraron este proyecto son:

¹⁰ El objetivo del encuentro fue el de crear obras transdisciplinarias basadas en el fenómeno de *Biohacking*, término incipiente que hace referencia al uso de la tecnología para modificar el funcionamiento del cuerpo humano con un objetivo estético.

- **Teresa Arias:** violoncello y arte escénico
- **Cinthya Dueñas:** artista corporal
- **Sergio Bromberg:** físico, programación y síntesis de sonido
- **Holkan Luna:** *hardware hacking*
- **Jesús Gómez:** sensor EEG, *Neurofeedback* y procesamiento de sonido

El objetivo inicial fue el de utilizar la señal digitalizada del EEG (la cual es a su vez es una abstracción de la actividad cerebral) como representación del concepto de control, principalmente en tres de sus significados:

1. La capacidad para interactuar o manipular una máquina/computadora a voluntad.
2. La capacidad de las nuevas tecnologías para mediar las relaciones interpersonales a través de procesos de control.
3. La capacidad de control que las nuevas tecnologías a su vez ejercen en la creación artística contemporánea.

Para esto, se utilizó la señal de las distintas bandas de frecuencia del EEG (alpha, beta, gamma, theta y delta) así como los procesos cognoscitivos de atención y meditación. A través de la manipulación de ciertos parámetros en distintos procesos de sonido, neuromusculares y visuales, se buscó experimentar con el concepto de control, el cual nunca llega a ser absoluto debido a las características del *Neurofeedback*, por lo que pensamos que da al *performance* un tono más realista y simbólico.



Figura 3.2 Presentación del performance *Irruptio* en Laboratorio Arte Alameda

4. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

4.1 ASPECTOS HISTÓRICOS Y TEÓRICOS DEL ELECTROENCEFALOGRAMA

El descubrimiento de la existencia de señales bio-eléctricas en los seres vivos por Luigi Galvani en 1791 revolucionó múltiples campos del conocimiento, principalmente el de la medicina y la fisiología. Sus experimentos en animales demostraron que la electricidad jugaba un papel fundamental en el movimiento muscular tanto en humanos como en animales y abrió la puerta al estudio de los fenómenos bio-eléctricos. Sin embargo, hasta 1858 es inventado el galvanómetro, la primera herramienta utilizada para detectar y medir la corriente eléctrica y nombrada así en honor a Galvani (Niedermeyer, 1982).

Emil Du-Bois Reymond (1818-1896) se convirtió en el principal promotor de la idea de un sistema nervioso basado en la electrofisiología. Descubrió los potenciales de acción en los nervios y es considerado el padre de la fisiología experimental. Otro descubrimiento importante de la época fue el de la velocidad de la conducción nerviosa por parte de Hermann von Helmholtz (1821-1894), lo que permitió que los electrodos usados en la investigación fisiológica se mejoraran (Niedermeyer, 1982).

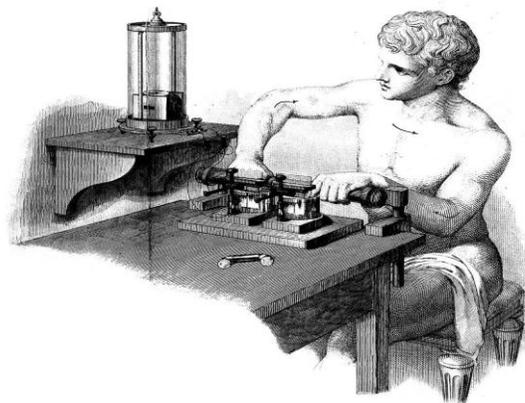


Figura 4.1. *Investigations into animal electricity II*. DuBois Raymond (1864).

El primer intento por medir la actividad eléctrica cerebral fue de Richard Caton (1842-1926), quien a pesar de trabajar con un rango muy pequeño de frecuencias (0 a 6 Hz), fue pionero en la técnica de potenciales evocados. Mas tarde abandonó por completo el estudio de la actividad cerebral, mas sigue siendo reconocido por sus descubrimientos de los potenciales fluctuantes que forman el Electroencefalograma.

En los años posteriores hubo una gran actividad en Europa del Este en el campo de las Neurociencias, en particular en universidades de Rusia y Polonia con avances como el descubrimiento de la capacidad del Sistema Nervioso de ser estimulado eléctricamente por G. Fritsch y J. Hitzig en 1870. Napoleon Cybulski (1854-1919) indujo y registró por primera vez un ataque epiléptico en perros de forma gráfica, utilizando un galvanómetro con un accesorio fotográfico (Niedermeyer, 1982).



Figura 4.2. Primeras fotografías publicadas de un electroencefalograma. Neminsky (1913) muestra los potenciales eléctricos del cerebro de un perro anestesiado, debajo de una grabación de pulsaciones de una arteria en el cerebro.

Mientras tanto, en Europa Occidental, el estudio de la neurofisiología se había mantenido alejado de los fenómenos eléctricos del cerebro, en parte debido a la ruptura entre DuBois Reymond y Caton, así como la proliferación de diversos campos de estudio ajenos a la electroencefalografía. Los partidarios

de la teoría de redes neuronales, los célebres Camilo Golgi y Santiago Ramón y Cajal lograron experimentalmente validar la teoría de la actividad eléctrica en el cerebro. De manera similar los partidarios del locacionismo cerebral y sus detractores, estaban en auge durante la época. Diversos estudios con cirugía en la corteza cerebral de animales como los de Friederich Leopold Goltz, junto con los de estimulación cerebral de Hitsch, Hitzig, Ferrier y Yeo, iniciaron una nueva era de interés en la localización cortical. Otro investigador importante durante este periodo fue Charles Scott Sherrington (1867-1954), quien en 1906 escribió el libro *The Integrative Action of the Nervous System* (1906). El alcance de este texto abarca desde la reflexología y la rigidez cerebral (*decerebrate rigidity*). Sin embargo, la persona que dejaría la huella mas grande en el desarrollo de la Electroencefalografía sería el neuropsiquiatra alemán Hans Berger (1873-1941). Se le acredita el descubrimiento del EEG humano y estaba al tanto de los estudios existentes, desde Caton hasta Cybulsky. Su primer reporte de un registro del EEG data de 1929, usando técnicas de grabación bipolar con electrodos en la región fronto-occipital en un solo canal siendo registradas en papel fotográfico con una duración de 1 a 3 minutos. Con esto su investigación empieza el estudio moderno de la actividad cerebral.

En el EEG, los potenciales eléctricos relacionados a la actividad cerebral son registrados por medio de electrodos colocados sobre el cuero cabelludo. La diferencia de voltaje entre electrodos es medida y debido a que la señal es débil, necesita ser amplificada. La corriente eléctrica sucede cuando las neuronas se comunican una con otra. Berger se dio cuenta de que existen diferentes frecuencias en la actividad eléctrica cerebral y que éstas podían estar relacionadas a diferentes acciones y etapas de la conciencia. A continuación una descripción de las diferentes frecuencias y los procesos a los que se les ha relacionado.

BANDAS DEL EEG

Gamma: Estas ondas cerebrales se encuentran en el rango de frecuencia de 31Hz y más. Se piensa que reflejan el mecanismo de la conciencia. En conjunto, Gamma y Beta han sido asociados a la atención, la percepción y la cognición. (Rangaswamy et al, 2002).

Beta: Se encuentran en el rango de frecuencias entre 12 y 30 Hz y se dividen en β_1 (High) y β_2 (Low) para mayor precisión. Son ondas pequeñas y rápidas asociadas con la concentración y atención, sobre todo cuando se localiza en áreas centrales y frontales. Al suprimir el movimiento o al realizar una tarea matemática, se da un incremento de la actividad beta (Zhang, Chen, Bressler & Ding, 2009).

Alpha: Van desde 7.5 a 12 Hz, son ondas más lentas y están asociadas a la relajación y el reposo. Cerrar los ojos y pensar en algo agradable resulta en un incremento de la actividad alpha. Es más pronunciada en los lóbulos occipitales y frontales.

Theta: Se encuentran en el rango de 3.5 a 7.5 Hz, y están ligados a la ineficiencia, al soñar despierto y en sus límites bajos al estado entre estar despierto y el sueño. También ha sido asociado con el acceso a material inconsciente, la inspiración creativa y la meditación profunda. Niveles altos de theta son considerados anormales en adultos y están asociados a trastornos como el Déficit de Atención (Heinrich, Gevensleven & Strehl , 2007).

Delta: Abarcan de 0.5 a 3.5 Hz, son las ondas cerebrales más lentas y ocurren principalmente durante el sueño (Hammond, 2006). Si se detectan durante la vigilia, pueden ser indicadores de algún defecto físico en el cerebro.

Símbolo	Letra	Rango de frecuencia
δ	Delta	0.5 – 3.5 Hz
θ	Theta	3.5 – 7.5 Hz
α	Alfa	7.5 – 12 Hz
β	Beta	12 – 30 Hz
γ	Gamma	30 – 80 Hz

Tabla 4.3. Bandas del EEG

La aplicación más común del EEG es para observar y estudiar el registro de la actividad cerebral en la detección e investigación de daños y trastornos cerebrales, como la epilepsia (Sundaram, Sadler, Young & Pillay, 1999). La investigación empírica y el estudio de casos a través de varias décadas han producido mapas funcionales del cerebro, que en combinación con electrodos colocados de acuerdo al sistema 10-20 hacen posible la observación de la actividad en estas áreas.

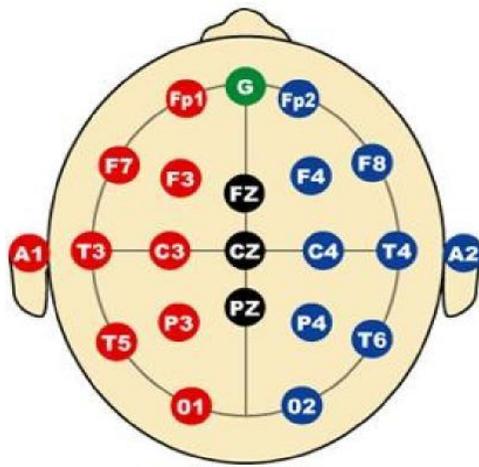


Figura 4.4 .El Sistema 10-20: (Immara, n.d)

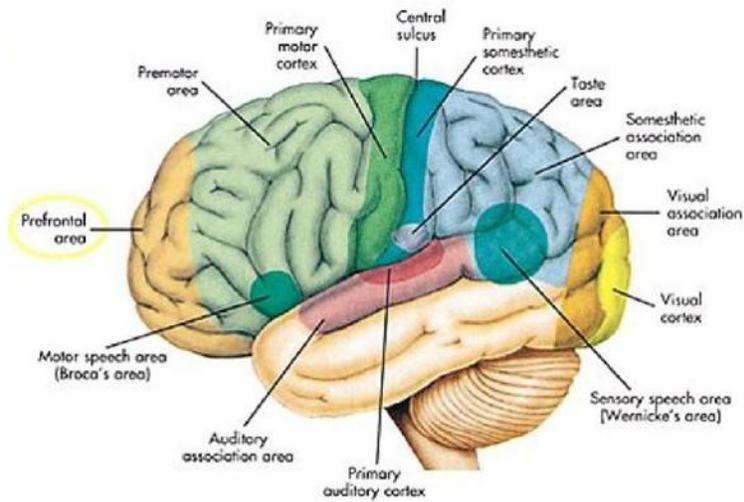


Figura 4.5. Mapa funcional del cerebro (Universe-review.ca, n.d.)

POTENCIALES RELACIONADOS A EVENTOS

El estudio de las ondas cerebrales y cómo se relacionan con los diferentes estados mentales, ha producido métodos diversos para medir y manipular la actividad eléctrica cerebral con el propósito de comprender fenómenos como la relajación, la concentración y la inteligencia. La exposición a estímulos externos, como un sonido o una imagen pueden generar respuestas en las ondas cerebrales, al igual que los estímulos internos como la anticipación o el recuerdo. Las respuestas que producen dichos estímulos se denominan Potenciales Relacionados a Eventos (ERP) o Potenciales Evocados (EP) y se obtienen haciendo un promedio del EEG en tiempo real a través de una computadora: se obtiene un fragmento de 1000 a 1500 mili-segundos cuyo inicio coincide con la presentación de un estímulo, con el objetivo de encontrar actividad eléctrica relevante a dicho estímulo. Se pueden observar diferencias en la amplitud de la onda (potencial) que ocurre con una latencia de tiempo específica después de la presentación del estímulo (Lukas et al., 1990).

El componente P300, es un potencial positivo que ocurre 300 mili-segundos después del estímulo y que ha recibido la mayor atención por parte de los investigadores debido a su alta respuesta ante situaciones de alta discriminación perceptual y cognitiva. Es particularmente sensible a la ocurrencia de eventos poco frecuentes y ésta parece reflejar un proceso de toma de decisiones, por lo que ha sido utilizado para el estudio de la atención.

La N400 es un componente negativo que empieza alrededor de los 200 mili-segundos y tiene su pico aproximadamente 400 mili-segundos después de la presentación de cualquier estímulo que transmita un concepto (Kutas & Federmeier, 2000; Kutas & Van Petten, 1994; Kutas & Hillyard, 1980). El papel de

la N400 se ha descrito en cuanto a la interpretación del significado (Daltrozzo and Schoen, 2009) y en los procesos de recuperación de la memoria semántica de la música (Steinbeis y Koelsch, 2008).

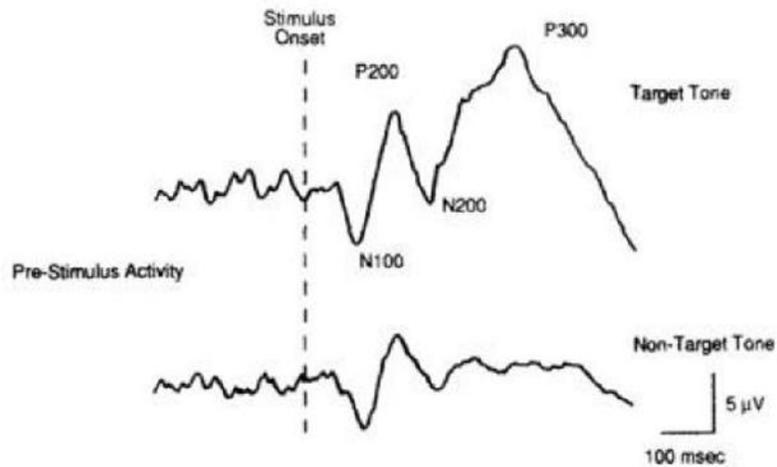


Figura 4.6 Ejemplo de un potencial evocado en respuesta a un estímulo auditivo. El componente P300 solo se observa después de la presentación de dicho estímulo. (Lukas et al., 1990).

La investigación con ERPs ofrece el potencial de probar aspectos detallados de la percepción, la cognición y de la experiencia consciente, a diferencia de los aspectos más globales representados por los cambios en las ondas coherentes (bandas del EEG). Al colocar electrodos en locaciones específicas del cráneo (sistema 10-20), se pueden obtener ERPs altamente localizados (Rosenboom, 1994).

La importancia de poder trabajar con sistemas de detección de procesos mentales basados en los Potenciales Relacionados a Eventos radica en la posibilidad de construir interfaces cerebro-computadora que reaccionen en tiempo real a procesos como la atención y la meditación, como veremos con más detalle en la metodología.

4.2 HISTORIA DEL ARTE CON SEÑALES BIOLÓGICAS

Habían transcurrido 31 años de la invención del Electroencefalograma por parte de Berger y sin embargo no fue sino hasta mediados de los 60's que tres personajes provenientes de diferentes disciplinas empezaron a abordar las bio-señales como una manera de generar arte y sonido. Estos tres artistas y científicos fueron Alvin Lucier, Manfred L. Eaton y David Rosenboom. Analizaremos algunas de sus obras y nos enfocaremos tanto en cuestiones estéticas como tecnológicas.

Desde 1934 los fisiólogos E.D. Adrian y B.H.C. Matthews describieron las características rítmicas de las ondas alpha del Electroencefalograma, al convertir dichas señales en audio. Si bien el interés en ese momento era el de desarrollar una herramienta diagnóstica sonora del Sistema Nervioso, fue el primer intento de traducir la señal electroencefalográfica en sonido. A pesar de que la idea de desarrollar un método de sonificación de las ondas cerebrales como medio diagnóstico no tuvo trascendencia en el ámbito médico, despertó el interés en el uso de bio-señales, en particular en las artes y la música.

Desde la aparición de los primeros artistas usando el EEG hasta la actualidad se distinguen dos etapas claramente definidas, tanto por su contenido conceptual, como por la tecnología empleada. La primera de estas etapas inicia 30 años después del descubrimiento del EEG y la llamaré *Etapas analógica*, debido al uso de equipos rudimentarios de EEG e instrumentos musicales electrónicos. Durante los años 60's y 70's existió un enorme interés por el *Neurofeedback* en las aplicaciones clínicas para el desarrollo de habilidades cognitivas como la atención y la meditación, situación que se

reflejó en el arte. Posteriormente, hubo una ausencia de investigaciones y creación artística que se prolongó toda la década de los 80's. Esto debido a que no se cumplieron las altas expectativas que se tenían sobre el *bio-feedback*, cuyos impulsores pensaron que podría desplazar a la terapia farmacológica en el campo clínico. A principios de los noventas, el desarrollo y la accesibilidad de los sistemas digitales permitió un resurgimiento del interés en el EEG, ahora con la creación de interfaces cerebro-computadora (BCI) y con protocolos de investigación más elaborados. A esta etapa la llamare *Digital*.

4.2.1 ETAPA ANALÓGICA (1963 - 1976)

En *Music for Solo Performer*, Alvin Lucier (1965) hace uso de bio-señales en una pieza artística por primera vez en la historia. Se trata de una sonificación de las ondas cerebrales a través de equipo electrónico analógico y un ensamble de percusiones. Esto da inicio al uso de señales biológicas, específicamente el EEG, en una obra artística. Durante este período que comprende de 1963 a 1976, surgieron varios músicos cuya búsqueda experimental se centró en la utilización de sistemas de *Neurofeedback* para intervenir sistemas musicales, particularmente sintetizadores y procesadores de sonido, previo a la aparición computadoras digitales capaces de procesar audio.

ALVIN LUCIER

Nacido el 14 de Mayo de 1931 en Nasha, New Hampshire, fue un compositor norteamericano de música experimental e instalaciones sonoras. Después de estudiar música en la universidad de Yale y Brandeis, pasa una temporada en Roma, en donde entra en contacto con el trabajo de John Cage,

Merce Cunningham, David Tudor y el movimiento *Fluxus*¹¹, lo que lo aparta por primera vez de su formación clásica. Es co-fundador de la *Sonic Arts Union*, pionera en la experimentación sonora y performática en los Estados Unidos. Los objetivos estéticos de este grupo tenían que ver: "... parcialmente con la electrónica casera, la exploración de la naturaleza de la acústica y cruzar las fronteras entre el teatro, las artes visuales, la poesía y la música" (Cox, 2003). Su trabajo y carrera estuvo caracterizada por una continua fascinación y exploración del funcionamiento del sonido como fenómeno físico. Algunos autores describen su proceso creativo como "diseño" en vez de "composición", y se refieren a la preocupación de Lucier por hacer del descubrimiento de los fenómenos físicos y acústicos un elemento principal dentro de su obra (Tenney en Lucier, 1995).

Su lista de obras se extiende por casi cuatro décadas y siempre es consistente con su búsqueda artística a través del fenómeno acústico. De acuerdo con Tenney (en Lucier, 1995) "...sus obras involucran prácticamente todos los fenómenos acústicos, incluyendo la transmisión y radiación del sonido, la reflexión, la disonancia, la resonancia, las ondas estacionarias, la retroalimentación, los pulsos y el habla". Su estilo de composición nos remite de alguna manera a experimentos de laboratorio, en los que el descubrimiento de los fenómenos físicos forma parte integral de la obra artística.

En *Music for Solo Performer*, Lucier hace uso de bio-señales en una pieza artística por primera vez en la historia. Lucier busca en esta obra explorar los aspectos naturales y no-culturales de la música y del

¹¹ Movimiento artístico de las artes visuales en especial, pero también de la música, la literatura y la danza. Tuvo su momento más activo entre la década de los 60 y los 70. Se declaró contra el objeto artístico tradicional como mercancía y se proclamó a sí mismo como un movimiento artístico sociológico. Fluxus fue informalmente organizado en 1962 por George Maciunas (1931-1978).

sonido: "...pienso que los fenómenos acústicos son universales, no culturales, por lo que he decidido explorar las características naturales de las ondas de sonido" (Rogalsky, 2010). Lucier utiliza las ondas alpha para generar sonido y éstas son por naturaleza involuntarias. A pesar de que la obra busca ir más allá del significado musical convencional y del crudo resultado, se logra una estética sonora capaz de ser analizada. La sonificación de las ondas cerebrales no es del todo incidental. La pieza tiene aspectos performativos y gracias al diseño se anticipa una intención musical. Además de la persona cuyas ondas cerebrales están siendo sonificadas, existe otro participante donde su objetivo consiste en cambiar la orquestación a lo largo de la pieza. Alvin Lucier es capaz de modificar el sonido proveniente de las ondas alpha en tiempo real ya sea cerrando los ojos o por medio del *biofeedback*, el cual consiste en el proceso de aprender a controlar la amplitud de las ondas cerebrales a través de un estímulo relacionado, en este caso el sonido.

Si bien el título de la obra no es el más adecuado ya que de acuerdo con el mismo Lucier:

...una de las imprecisiones del título es que no es en realidad para un solo intérprete. Se necesita de alguien para manejar los amplificadores, pausar los sonidos, encender y apagar las bocinas y siempre lo he hecho con otra persona, un asistente. En la partitura que escribí, se estipula que algún día, cuando la electrónica evolucionara a lo que hoy se ha vuelto, se podría tener una orquestación automatizada, de manera que una cantidad de pulsos alfa controlarían un dispositivo o *switch*, prescindiendo así del asistente (Lucier, 1995).



Figura 4.7 Partitura de *Music For Solo Performer* (1968).

Alvin Lucier es un compositor que de muchas maneras materializó las visiones de la vanguardia sonora de principios y mediados del siglo pasado. Su estética parece tomar influencia de Luigi Russollo , quien en su *Manifiesto Futurista* vaticinaba que la revolución musical tenía un paralelismo con la proliferación de las máquinas en las labores humanas (Russollo, 1913). De igual manera Pierre Schaeffer, en su obra *Tratado de los objetos musicales* (Schaeffer, 2003) y ante las nuevas formas musicales, plantea la necesidad de un puente entre los elementos perceptibles de la música y sus parámetros acústicos. Lucier es un compositor que no duda en tomar elementos de otras disciplinas como la acústica, la psicoacústica y las neurociencias. Pionero de la música electroacústica y el arte sonoro, se puede escuchar su influencia en generaciones posteriores de músicos e investigadores. David Rosenboom (de quien hablaremos mas adelante), en la monografía *Extended Musical Interface for the Human Nervous System* expande la visión de Lucier sobre las características musicales de las

ondas cerebrales y es hasta la fecha un referente teórico sobre la utilización de bio-señales para la creación artística. El impacto de la obra de Lucier se extiende también a las ciencias naturales , en particular en el caso de las interfaces cerebro-computadora y el *Neurofeedback* (Reck Miranda, 2006).

MANFORD L. EATON

Bio-música es un termino acuñado por el grupo ORCUS Research para describir una clase de sistemas electrónicos que utilizan potenciales biológicos en ciclos de retroalimentación para inducir estados fisiológicos/psicológicos predecibles, replicables y que pueden ser controlados en tiempo real (Eaton, 1973). El objetivo era crear un sistema de improvisación espontánea que no estuviera ligado a las limitaciones mecánicas/acústicas de la instrumentación convencional. Estas técnicas involucran el control de parámetros fisiológicos a través de estimulación sensorial, por lo que es necesario explicar el concepto de *biofeedback*.

La retroalimentación biológica (o *biofeedback*) es una técnica que se emplea para controlar las funciones biológicas del organismo humano, mediante la utilización de un sistema de retroalimentación que informa al sujeto del estado de la función que se desea controlar de manera voluntaria. El paradigma del *biofeedback* se articuló a través del trabajo de Neal Miller de la Universidad Rokerfeller en Nueva York a principios de los años sesenta. Miller dedicó mas de 30 años de investigación al estudio del aprendizaje en animales y en humanos, logrando cuestionar seriamente el concepto del Sistema Nervioso dividido tajantemente en dos partes: la voluntaria y la involuntaria. Miller junto a Leo DiCara demostraron que los organismos vivos podían aprender a controlar voluntariamente el comportamiento de funciones biológicas, como la frecuencia cardiaca, la presión

arterial, las respuestas vasomotoras, la salivación, la formación de orina, la motilidad gástrica y otros procesos metabólicos que se consideraban hasta el momento inmunes al control consciente (Rosenboom, 1994). Hace algunas décadas, el paradigma de *biofeedback* como había sido heredado de la cibernética, fue considerado una alternativa a las escuelas dominantes de la psicología como el conductismo. En términos sencillos este paradigma define un estado “meta” para un proceso, cuyo resultado es comparado con la meta deseada. Una señal de corrección es generada por el organismo y se combina con la señal de entrada de manera que se aproxime progresivamente al estado meta. De acuerdo con Manfred Eaton, con el monitoreo biológico en tiempo real y la generación electrónica de estímulos visuales y auditivos, es posible ajustar en tiempo real el estímulo presentado de manera que pudiese componer, no a modo de notas musicales, sino por medio de un estado fisiológico/psicológico que controlase la generación del estímulo sonoro o visual deseado. Algunos de las señales biológicas utilizadas en el *biofeedback* son:

1. Respuesta galvánica de la piel (GSR)
2. Electrocardiograma (EKG)
3. Electroencefalograma (EEG)
4. Electromiograma (EMG)
5. Movimientos oculares (EOG)
6. Presión arterial
7. Respiración

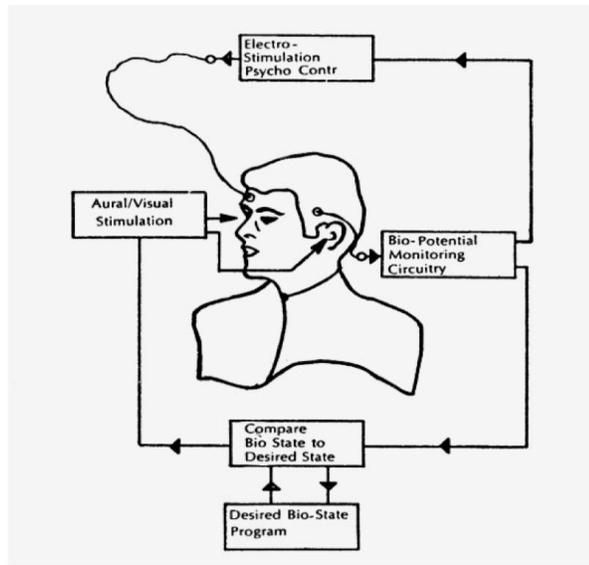


Figura 4.8 Los elementos básicos de un sistema de Bio-música (Eaton, 1973)

Un sistema de estas características involucra uno o más de los siguientes tipos de estimulación:

1. **Estimulación sensorial:** se refiere no solo a la estimulación por los sentidos visual y auditivo, sino también a la estimulación eléctrica de los músculos y la estimulación emocional a través de fotografías, el lenguaje oral y sonidos emocionales relacionados al dolor, placer, tensión, éxtasis, etc.
2. **Deprivación sensorial:** resulta de la ausencia de estímulos en el medio ambiente, de manera similar a lo que sucede en una cámara anecóica -un cuarto especialmente diseñado para cancelar la reflexión del sonido-. Después de un tiempo en una situación de deprivación sensorial, el sujeto se torna progresivamente desorientado y los procesos inconscientes empiezan a tomar predominancia.

3. **Bombardeo sensorial:** es lo contrario a la privación sensorial y consiste en una fluctuación al azar de amplitudes, duraciones, colores, direccionalidad de luces y colores que son aplicados simultáneamente al sujeto, con el objetivo de inducir un estado alterado de conciencia.

De acuerdo con Eaton (1973), existen dos modos de *biofeedback* en relación a los procesos de voluntad del organismo en su estado natural. Estos son:

1. **Modo voluntario-involuntario:** Es el más común y documentado. Involucra el uso de retroalimentación sensorial (visual o sonora) para controlar alguna función fisiológica considerada normalmente como involuntaria. Un ejemplo es el uso de el ritmo cardiaco para controlar un sistema de iluminación en el cual dicho ritmo controla la luminosidad, a mayor ritmo cardiaco mayor es la luminosidad. En poco tiempo el participante sería capaz de controlar su ritmo cardiaco en buena medida.
2. **Modo involuntario-voluntario:** Este segundo método consiste en el control involuntario a través de un sistema de *biofeedback* de parámetros fisiológicos que están normalmente bajo el control de la voluntad. Un ejemplo de esto es el *performance* por el colectivo *Irruptio* (Gómez, Arias, Bromberg, 2015) en el que la señal electroencefalográfica controla un sistema de *biotense*, cuyos impulsos eléctricos intervienen los músculos de un *performer*, anulando así temporalmente el control voluntario de sus músculos (Ver Anexo II – Obras derivadas).

Manford L. Eaton de igual manera propone una filosofía de la Bio-música a partir de la estética en la transmisión de la información. Para él, los modos de comunicación más eficientes son aquellos que son espontáneos, ya que el tiempo de planeación de cómo y cuándo se transmitirá con la información

que resulta en un flujo discontinuo en el que el transmisor y receptor interrumpen la comunicación por breves periodos de tiempo. Otro problema resulta de que al momento de recibir dicha información, ésta ya es obsoleta y/o menos relacionada a situaciones reales. La filosofía de la Bio-música es la de hacer posible la comunicación con la máquina a nivel fisiológico y en tiempo real; que esta comunicación sea multidireccional y que se logre de manera espontánea y continua, aún cuando todo tipo de comunicación involucra algún tiempo de retraso.

Hay que tomar en cuenta que sus teorías fueron concebidas en 1973, una época donde “..los diversos campos de conocimiento cuyas actividades están involucradas en la Bio-música han tenido muy poco contacto en este siglo y aún cuando hay señales de cambio, debemos tomar responsabilidad de nuestras ideas y guiarnos a metas mas humanistas” (Eaton, 1973).

Para Eaton, el desarrollo en la vida de un ser humano involucra el descubrimiento de nuevos estados de conciencia y el proceso de aprender a controlarlos. El niño aprende a controlar su atención al enfocar su conciencia en aspectos concretos y abstractos de su entorno. Mas adelante, durante la etapa escolar aprende a controlar ciertos aspectos de su medio ambiente. Es la escuela en donde aprende a enfocar su atención predominantemente en resolver problemas verbales y/o simbólicos y a recordarlos. Esta atención forzada la considera un problema en el desarrollo ya que a largo plazo obliga al individuo a buscar alivio en formas de entretenimiento efímeros y/o alienantes; más que nunca el ser humano se encuentra rodeado de distracciones, las cuales a veces son perjudiciales para el desarrollo y la psique. Mas allá de eso, la exclusión de estados de conciencia diferentes significa subordinar los procesos creativos. Sin embargo, para que un estado alterado de conciencia sea valioso debe tener un papel en la supervivencia humana. Esta utilidad yace en la necesidad de brindar contrapeso y equilibrio a los estados mentales que predominan en la sociedad actual.

DAVID ROSENBOOM

Otro de los artistas e investigadores que utilizan el paradigma del *biofeedback* para la creación musical es David Rosenboom. A diferencia de Eaton y el ORCUS Research Group, el equipo de trabajo de Rosenboom continuó desarrollando el uso del EEG en la música durante varias décadas y su monografía *Extended Musical Interface for the Nervous System* (1994) continua siendo uno de los principales referentes teóricos en la materia hasta la actualidad. Al igual que Eaton, hace uso extensivo del paradigma de *biofeedback*, aunque lo llevó a otro nivel de sofisticación utilizando los Potenciales Relacionados a Eventos (ERPs) y la teoría de sistemas en la realización de sus sistemas musicales. Rosenboom considera la clasificación de las ondas cerebrales como un continuo integrado, en donde las ondas lentas representaban el extremo inconsciente mientras que el otro extremo de ondas cortas se orienta a los estados de alerta y toma de decisiones.

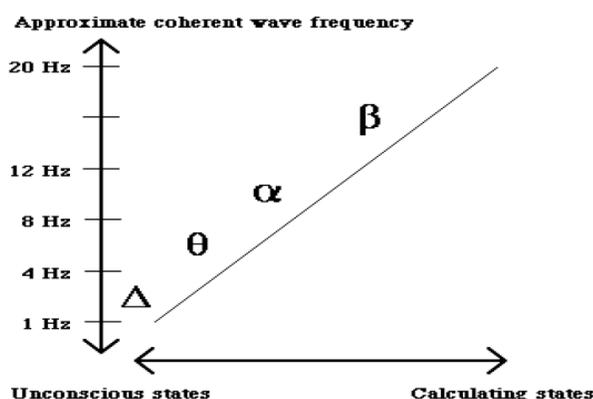


Figura 4.9 Las bandas del EEG como un continuo integrado

Rosenboom hace numerosas observaciones e inferencias útiles para la aplicación del EEG en la experiencia musical. En la escucha musical activa, el participante maximiza su experiencia al interactuar con estímulos variados. Se realizan asociaciones visuales y auditivas, las cuales suceden tan rápido que no es posible para la persona tener conciencia plena del conocimiento adquirido de manera inmediata. Considera que la cognición musical tiene su propia temporalidad, la cual sopesa independiente de otros estados mentales, como el procesamiento lingüístico (Rosenboom, 1994).

Sus obras musicales con *biofeedback* se extienden por más de dos décadas y son un indicador claro de la evolución de la música generada por EEG durante ese período. A continuación haremos un análisis de una de sus obras: *On Being Invisible*, que en palabras del autor es la que contiene mayor riqueza estética, simbólica y metafórica basada en su trabajo con sistemas de *biofeedback*.

El objetivo principal era crear un sistema de sonificación dependiente del proceso de la atención. Buscaba crear una situación en la que la sintaxis del lenguaje musical se auto-organizara en base a la forma de la percepción del sonido. A este modelo de *biofeedback* lo llamó *Cibernética del lenguaje y la cognición*. La obra, la cual tuvo diferentes versiones, incluía los siguientes componentes:

1. Un mecanismo de generación musical acoplado a un sistema de síntesis de sonido.
2. Un modelo de percepción que detecta y predice los efectos perceptuales de los fenómenos que ocurren en una estructura musical generativa.
3. Una entidad perceptual e interactiva (el intérprete humano).
4. Un sistema de análisis e interpretación de las señales *bio-eléctricas*.
5. Un mecanismo de control que ajuste y dirija la respuesta ante el sistema musical.

El intérprete humano actúa tanto como entidad perceptual e interactiva, como de modelo de percepción musical que hace las predicciones.

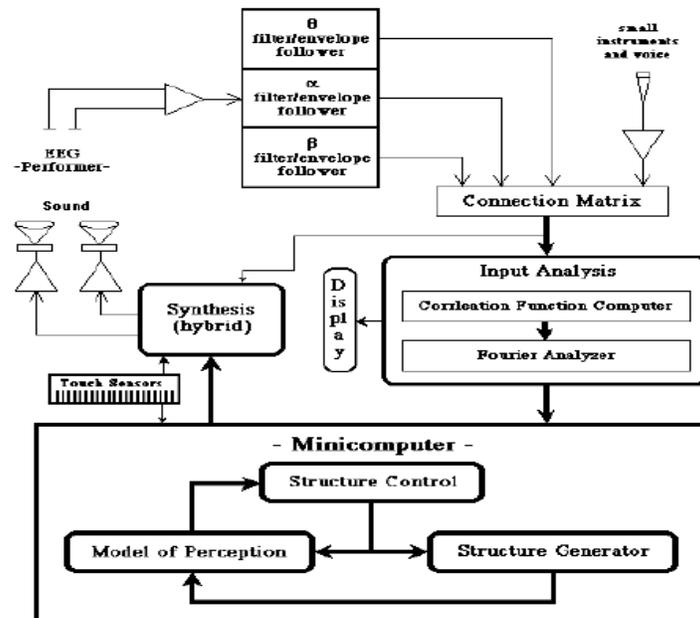


Figura 4.10 Diagrama de flujo: *On Being Invisible* (1976-1977)

Además de los autores e investigadores de los que hemos hablado en este capítulo, hubieron otros creadores y líneas de investigación, de las que destacamos a Richard Teitelbaum, miembro del colectivo de música electrónica *Musica Ellectronica Viva*, con base en Roma. En su obra *Spacecraft* (Teitelbaum, 1967) utiliza varias señales biológicas como el Electroencefalograma y el Electrocardiograma para controlar sintetizadores electrónicos. En Francia, el investigador Roger Lafosse en colaboración con el pionero de la música concreta Pierre Henry, desarrollaron un sistema para interpretación de música e imagen en vivo llamado *Corticalart* (1971). Sin embargo, es de estos tres autores (Lucier, Eaton y Rosenboom), de quien tomaremos aspectos muy específicos para el

desarrollo de nuestro sistema de sonificación de ondas cerebrales en tiempo real.

4.2.2 ETAPA DIGITAL (1990 – ACTUALIDAD)

Hacia finales de los años 70, se dio un vacío en la producción artística con señales biológicas y en general el *biofeedback* entró en una etapa de recesión al no cumplir las altas expectativas que se tenía sobre ésta técnica. En parte esto se debió también a la falta de accesibilidad a la tecnología y de la falta de computadoras suficientemente poderosas para manejar la información en tiempo real. Sin embargo paralelamente a estos esfuerzos, un investigador de UCLA estaba logrando avances en la construcción de la primera interface cerebro-computadora (BCI por sus siglas en ingles). Jacques Vidal a pesar de no lograr todos sus objetivos con este proyecto, sí dio un paso definitivo en el campo y en 1973 publicó un artículo pionero para su tiempo *Toward Direct Brain-Computer Communications*. En él, propone por primera vez la integración de la señal del EEG con las computadoras con el objetivo de controlar sistemas como aparatos prostáticos o vehículos. Para Vidal, el ser capaces de lograr un vínculo directo entre los procesos mentales usados en la solución de problemas y las capacidades deductivas de la computadora era la meta fundamental en la comunicación hombre-máquina, haciendo de esta última una verdadera extensión del cerebro (Vidal, 1973). En 1998 hace una revisión sobre el campo en un artículo titulado *Cyberspace Bionics*, en el que predice que muchas de las actividades humanas en el futuro inmediato serán llevadas por la tecnología computacional a un espacio que ya comenzamos a llamar “Ciberespacio”, predicción que hemos visto cumplirse progresivamente con los años y en la cual el internet y las redes sociales han cumplido un papel fundamental. La relación hombre-computadora ha pasado en un corto tiempo del teclado a las interfaces gráficas, la realidad virtual y por supuesto, el *biofeedback*. Considera que solo

recientemente, la tecnología ha llegado al punto en que es posible mapear en tiempo real los estados mentales, haciendo las interfaces cerebro-computadora una realidad, aunque sus aplicaciones prácticas continúan siendo un campo inexplorado (Vidal, 1998).

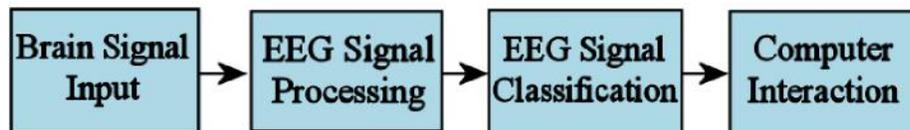
INTERFACES CEREBRO-COMPUTADORA

En los últimos 15 años han surgido proyectos productivos en el campo de las interfaces cerebro-computadora, debido a nuevos descubrimientos en las funciones cerebrales, la accesibilidad a computadoras más potentes y por el reconocimiento a las necesidades de personas con discapacidad. Las interfaces modernas determinan la intención del usuario con una variedad de señales electrofisiológicas, incluyendo los potenciales P300 y las ondas alpha y beta; éstas son traducidas en tiempo real en comandos que operan computadoras u otros equipos. (Wolpaw, Birbaumer, McFarland, Pfurtsscheller & Vaughan, 2010).

Según Wolpaw et al (2010), la interface cerebro-computadora (Brain-Computer Interface o BCI), es un método de comunicación basado en actividad neurológica que es independiente de la señal de los nervios periféricos y los músculos. La meta del BCI es brindar un nuevo canal de salida para el cerebro que requiere control voluntario adaptativo del usuario. Se han identificado cuatro diferentes aplicaciones del BCI:

1. **Bio-ingeniería:** dispositivos de asistencia para personas con discapacidad.
2. **Monitor de sujetos experimentales:** investigación y detección de desórdenes del sueño, trastornos neurológicos, procesos de atención y estado mental en general.

3. **Investigación en neurociencias:** métodos en tiempo real para correlacionar conductas observables con registros de señales neurológicas.
4. **Interacción entre humanos y máquinas:** dispositivos de interface entre seres humanos, computadoras o máquinas (Wolpaw et al, 2010).



1. Entrada 2. Procesamiento 3. Clasificación 4. Interacción

Figura 4.11 Elementos básicos de una interface cerebro-computadora (Wolpaw et al, 2010)

Una de las primeras aplicaciones dadas a las BCI es la de ayudar a personas con discapacidad a comunicarse con las computadoras y con otras personas. Uno de los mejores ejemplos es el de un ratón (mouse) que es operado a través de señales de Electroencefalograma y Electromiograma. Wolpaw, McFarland, Neat & Forneris (1991), desarrollaron un nuevo modelo de comunicación y control para individuos con déficit motriz severo. Se entrenaron a los sujetos para utilizar las ondas cerebrales en el rango de los 8 a 12Hz con electrodos colocados en el sulco central, para mover un cursor en el centro hacia diversos objetivos de una pantalla. En 1990, Benjamin Knapp y Hugh Lusted crean una interface llamada *Biomuse*, el cual permitía que un humano controlase ciertas funciones de una computadora a través de señales biológicas, que incluían el EEG y el EMG. Los componentes de dicho sistema eran los siguientes:

1. **Usuario:** es la persona cuyos impulsos nerviosos, ya sea del encéfalo o musculares, son traducidos en señales que la computadora interpreta.

2. **Amplificador:** los micro-voltajes que captan los electrodos necesitan ser amplificados en gran medida, por lo que son necesarios mecanismos para aislar el ruido o “artefactos” (señales espurias).
3. **Convertidor análogo-digital (ADC):** la señal amplificada necesita traducirse a un lenguaje que la computadora pueda entender, por lo que es procesada (sampleada) a una velocidad tan rápida como 4000 veces por segundo.
4. **Procesador de señal digital (DSP):** se trata de un *chip* de computadora, de muchas maneras parecido a un circuito integrado o unidades centrales de procesamiento en una computadora personal. Sin embargo, éste en particular está diseñado para procesar de manera rápida y eficiente las señales captadas y encontrar patrones en ellas.
5. **Aislamiento óptico:** siempre se conectan electrodos a la piel y a una fuente de alto voltaje, existe el riesgo de *shock* eléctrico, por lo que es necesario tener precaución. En este caso se optó por transmitir la señal por vía óptica.
6. **Computadora personal:** fue utilizada para desplegar la información obtenido por los demás componentes del sistema, al igual que para controlar otras computadoras u aparatos electrónicos (Lusted, H. & Knapp, R., 1996).

INTERFACES MUSICALES MODERNAS

Atau Tanaka, artista experimental e interdisciplinario, hizo uso extensivo del sistema *Biomuse* en composiciones musicales que dependían exclusivamente de señales musculares. Usaba señales de electrodos colocados en los músculos de los brazos, éstas operaban una computadora que a su vez controlaba otros equipos electrónicos.

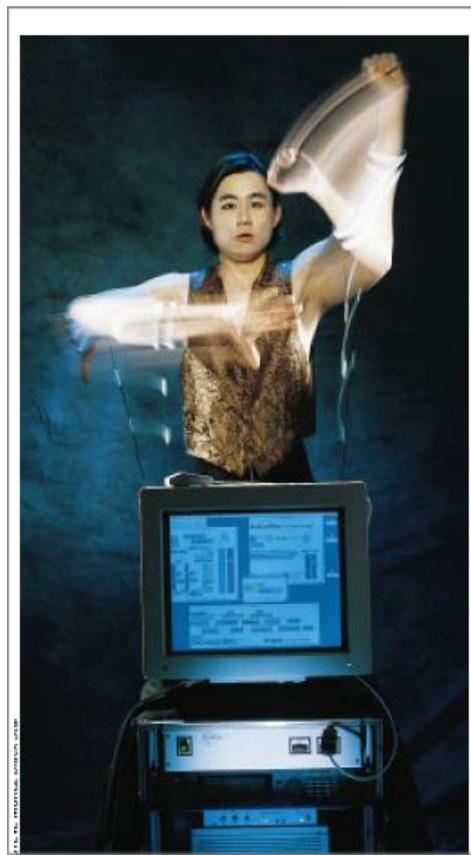


Figura 4.12 Atau Tanaka y el sistema *Biomuse*

Este sistema y la investigación derivada de sus aplicaciones artísticas crearon un nuevo interés en el uso de las señales biológicas, incluyendo el EEG . La accesibilidad a procesadores digitales más sofisticados y los avances en neurociencias han creado un entorno en el que artistas de diversas

partes del mundo han retomado la utilización de distintas señales biológicas como parte de sus obras. De acuerdo con Browse (2004), se ha dado una bifurcación entre los que utilizan esta tecnología de manera inocente, sin conocer la historia de la música generada por EEG y de las investigaciones que lo han hecho posible y aquellos que tienen una aproximación con un carácter más científicamente riguroso.

Lisa Park en su instalación sonora *Euonia* (2011) y *Euonia II* (2012), utiliza la señal del *Neurosky Mindwave* para producir sonido por medio de transductores que a su vez crean patrones visuales en la superficie de recipientes con agua.



Figura 4.13 Lisa Park “Euonia” (2011)

En México existen antecedentes de arte y música generados con EEG y otras bio-señales. El colectivo *Interspecifics* integrado por Leslie Garcia y Paloma López, crea en 2014 un proyecto de investigación en Neuro-estética llamado *Potencial de Acción*, cuyo objetivo fue “estudiar las posibles relaciones entre la percepción del arte y las señales bio-eléctricas que ésta produce en el cerebro en términos de su observación y escucha activa”¹².

El experimento consistió en hacer uso de una interfaz *wireless* cerebro-computadora para obtener el registro bioeléctrico cerebral de 20 voluntarios de distinta edades y practicantes de diferentes disciplinas que fueron sometidos a tres diferentes estímulos: el sujeto en observación activa de una de las obras del recorrido, en escucha activa de un texto de Octavio Paz referente a la obra y los dos estímulos a la vez. Una vez realizado el muestreo, se hizo la conversión de las señales en sonido utilizando el protocolo OSC en Pure Data, y en gráficos a través de *Processing* con el diseño de un algoritmo de interpretación de datos.

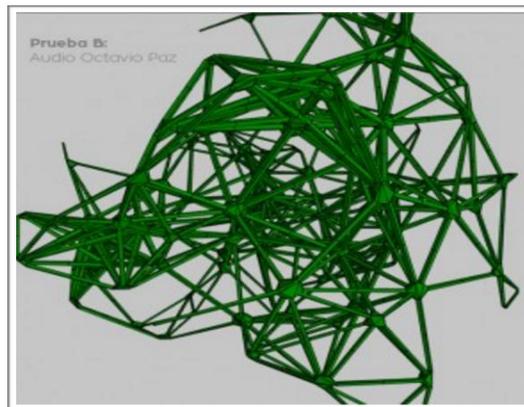


Figura 4.14. Visualización del registro encefalográfico en la escucha en *Potencial de acción*

¹² Descripción y visualización del Proyecto en: <http://interspecifics.cc/potencial>

Jaime Lobato Cardoso, compositor, artista multimedia y curador independiente egresado de la Facultad de Música de la UNAM, en su reciente obra *Burning Thoughts*, una escultura interactiva que es activada por un participante, a través de un dispositivo conocido como tubo de Rubens y que funciona con fuego, sonoriza y visualiza, los datos procesados. En esta ocasión se utilizó el dispositivo *Neurosky Mindwave*¹³ de nueva cuenta.



Figura 4.15 *Burning Thoughts* de Jaime Alonso Lobato Cardoso en el Festival In-Sonora (2015)

¹³ <http://in-sonora.org/ficha-obra/burning-thoughts/9>

Otro exponente nacional que utiliza interfaces cerebro-computadora es Aimée Theriot¹⁴. En la pieza *Des/composición*¹⁵ utiliza las distintas bandas del EEG para crear diferentes movimientos, alternando los sonidos generados con improvisaciones de instrumentos acústicos en vivo y diversos *samples*. La idea al re-utilizar este material sonoro de sesiones de improvisación libre es de alguna manera reciclar elementos sonoras que surgieron en cierto momento y retomarlos para crear una composición, una especie de collage sónico. La intención al hacer éste "reciclaje sonoro" está de alguna manera inspirada en la premisa de Cornelius Cardew de que "los documentos, como grabaciones de cinta de improvisación están esencialmente vacíos" (Theriot ,2016) . Estoy fundamentalmente de acuerdo con su premisa, la improvisación libre es una forma de arte que debe ser experimentada en vivo, de cualquier manera, considero que la documentación es un paso importante para recrear aunque sea el esqueleto de una improvisación, y en mi caso, para retomar ciertas ideas sonoras y tergiversarlas para que adquieran un nuevo significado, metiendo dentro del proceso la chispa binaria creadora (¿o destructora?) de una máquina.

¹⁴ Puedes consultar su trabajo en: <http://www.aimeetheriot.com/>

¹⁵ Visualiza aquí la obra: <http://www.aimeetheriot.com/descompuesto>

5. Irruptio: una aproximación transdisciplinaria a las interfaces cerebro-computadora

5.1 METODOLOGÍA

En este apartado se describen las herramientas utilizadas en la creación de *Irruptio*, que desde una perspectiva tecnológica es una interface de retroalimentación biológica compleja e involucra la utilización de diversos sensores, neuroestimuladores, microcontroladores, computadoras y programas. Requiere de la interacción de dos artistas escénicos cuyas interpretaciones e intercambios están mediados por tecnología digital de formas que serán descritas en el presente capítulo. Un sistema de retroalimentación biológica tradicional esta compuesto, como hemos visto en capítulos anteriores, por un organismo biológico, uno o varios sensores y una computadora. En este caso, este modelo se ha ampliado para crear una experiencia escénica con interacciones en tiempo real entre dos organismos y diversos procesos de transducción biológico-digital.

SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO Y SOFTWARE LIBRE

La utilización de *software* libre y de código abierto para la realización del proyecto fue, desde sus inicios una necesidad inherente al tema de estudio. Fue dentro de la comunidad de usuarios de estas plataformas en donde se encuentran los antecedentes y recursos tecnológicos necesarios para comenzar a utilizar la señal del EEG en el contexto del arte digital. No tenemos conocimiento hasta el momento de la existencia alguna de la aplicación *hardware* y/o *software* comercial que utilice la señal del EEG para estos propósitos.

Existen razones éticas para la utilización de *Software* Libre y de Código Abierto, y creemos que los hallazgos y resultados que se obtuvieron durante el proyecto deben ser libres, no simplemente en el sentido de gratuito, sino en el sentido que plantean Richard Stallman y Lawrence Lessig: “El software es parte de una cultura abierta y libre que contribuye a un cambio social y que no está sujeto a las restricciones del copyright, estructura que deliberadamente limita el desarrollo cultural”.

Uno de los objetivos de esta tesis es brindar una guía teórico-práctica para personas interesadas en profundizar en las interfaces cerebro-computadora musicales desde una perspectiva didáctica, abierta y comunitaria. Por ello es necesario que el lector y posible experimentador tenga las cuatro libertades esenciales del *software* libre: 1) la libertad de ejecutar el programa como y cuando se desee, con cualquier propósito, 2) la libertad de estudiar cómo funciona el programa y cambiarlo para adaptarlo al uso personal, 3) la libertad de redistribuir copias sin ninguna restricción y 4) la libertad de distribuir sus copias modificadas a terceros. Todos los programas, instrumentos virtuales y resultados estarán disponibles bajo una licencia de *Creative Commons* en la siguiente liga: <https://github.com/subcorticalmedia/Neurosky-Music>

NEUROSKY MINDWAVE MOBILE

Neurosky Mindwave es uno de los primeros dispositivos de Electroencefalografía orientado al mercado del consumidor global que hizo posible que dicha tecnología no este limitada al uso médico y ha abierto su uso en entornos educativos y de entretenimiento. Utiliza un solo sensor y se comunica de manera inalámbrica vía *Bluetooth* con computadoras personales y microcontroladores como *Arduino*. Cabe mencionar que aunque no se trata estrictamente de *hardware* de código abierto, la accesibilidad a modificar (hackear) sus aplicaciones, han hecho que sea muy aceptado en las comunidades *makers*, teniendo una función en la educación sobre *Neurofeedback* e interfaces cerebro-computadora (BCI). A pesar de ser un equipo muy sencillo, es capaz de analizar las diferentes bandas del Electroencefalograma, además de medir los niveles de atención y meditación.

El dispositivo tiene las siguientes ventajas:

1. **Accesibilidad:** está disponible para su compra en la mayoría de las tiendas en línea.
2. **Inalámbrico:** la conectividad vía *bluetooth* hace posible que el operador del sistema pueda realizar casi cualquier movimiento sin interrupciones.
3. **Electrodos secos:** lo que quiere decir que no requiere de algún gel conductor y es fácil de colocar por ser un solo electrodo sobre la corteza prefrontal.
4. **DSP y ADC:** el diseño de la diadema *Neurosky* incluye la tecnología *eSense* que facilita la detección sin artefactos (interferencias) y permite la detección de estados mentales como la atención y la meditación, así como su conversión a datos discretos (Neurosky, *eSense*, 2011).
5. **Hackeabilidad:** a pesar de que el aparato y la tecnología *eSense* no es de código abierto, sí permite que la señal sea intervenida con *software* de código abierto.

En cuanto a sus limitaciones más importantes es la de tener un solo electrodo, lo que limita las posibilidades de detección de estados psicológicos localizados en otras áreas de la corteza y que solo produce un dato numérico cada segundo, distando por mucho de ser una señal continua. En la primera parte de esta investigación se ideó una solución para este problema en Pure Data (ver Anexo 2).



Figura 5.1. Neurosky Mindwave Mobile

A pesar de la popularidad del aparato, hemos encontrado pocas aplicaciones musicales sistematizadas que utilicen el *Neurosky Mindwave*, de entre ellas destaca el sistema *HTMI* desarrollado por Eufrazio Prates y que está hecho para la plataforma Max/MSP¹⁶. Otro de los sistemas que vale la pena mencionar es un módulo *hardware* llamado *BI1 Braininterface* de www.sound-machines.it que

¹⁶ holofractalmusic.wordpress.com

transmite la señal del *Neurosky* a sintetizadores modulares análogos vía control de voltaje (CV o voltage control).

PROCESSING Y OPEN SOUND CONTROL

*Processing*¹⁷ es un ambiente de programación basado en *Java* muy utilizado por artistas visuales y gráficos. Es un un programa de código abierto, lo que permite que muchos proyectos se puedan adaptar y reutilizar para otras aplicaciones. En este proyecto su uso se limitará a servir como visualizador y convertidor de la señal proveniente del *Neurosky Mindwave* a señales OSC que el generador y procesador de sonido PureData pueda interpretar. El punto de partida fue un programa llamado *Brain Grapher*¹⁸, creado por Eric Mika en el NYU y que sirve para visualizar los cambios en los componentes del EEG a lo largo del tiempo. Este proyecto fue adaptado por Cristian Bañuelos y Jesús Gómez para traducir estas señales y exportarlas en tiempo real con el protocolo de comunicación OSC.

Open Sound Control (OSC) es un protocolo de comunicación entre computadoras, sintetizadores de sonido y otros equipos multimedia optimizado para las tecnologías de red modernas. Por la misma razón cuenta con muchas ventajas sobre el protocolo MIDI como: interoperabilidad, precisión, flexibilidad y organización. Con este protocolo se tienen todas las herramientas para el control en tiempo real del sonido y multimedia de manera flexible y fácil de implementar y sin él sería imposible la realización de este proyecto.

¹⁷ processing.org

¹⁸ github.com/kitschpatrol/BrainGrapher

Algunas de las áreas de aplicación del protocolo OSC incluyen: instrumentos musicales electrónicos basados en sensores y gestos, mapeo de información no musical a sonido, control musical compartido con múltiples usuarios, interfaces en redes, interpretación musical vía red LAN y realidad virtual.

Nuestra versión modificada del Brain Grapher esta disponible en el repositorio:

<https://github.com/subcorticalmedia/Neurosky-Music>

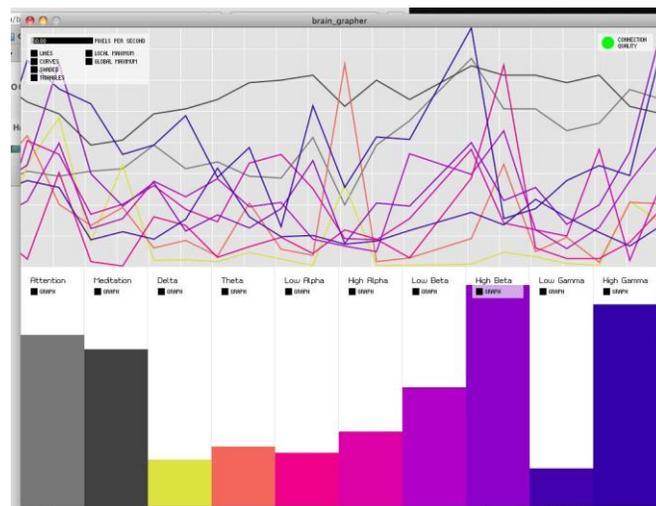


Figura 5.2 Brainwave Visualizer para *Processing*

PURE DATA

Es un *software* libre desarrollado por Miller Puckette en los años noventa. Ha tenido enorme éxito tanto en la comunidad científica como en la artística ya que al ser un entorno de programación visual basado en objetos, permite a personas sin amplios conocimientos de programación crear proyectos extraordinariamente complejos y flexibles. Además es compatible con su homólogo en *software* privativo Max/MSP. Por estas razones, además de su capacidad de procesar el audio en

tiempo real y de interactuar de manera efectiva con el microcontrolador *Arduino*, fue elegido como base para este proyecto.

ARDUINO

Es una placa de código abierto que contiene un microcontrolador y una serie de entradas y salidas que permiten que esta sencilla computadora pueda interactuar con el mundo físico a través de diversos periféricos, sensores que captan señales del entorno y mecanismos para interactuar con el mismo. Debido a que es relativamente accesible y compatible con plataformas como *Processing* y *Pure Data*, es un dispositivo muy popular en obras que utilizan algún tipo de sensor y/o interactividad.

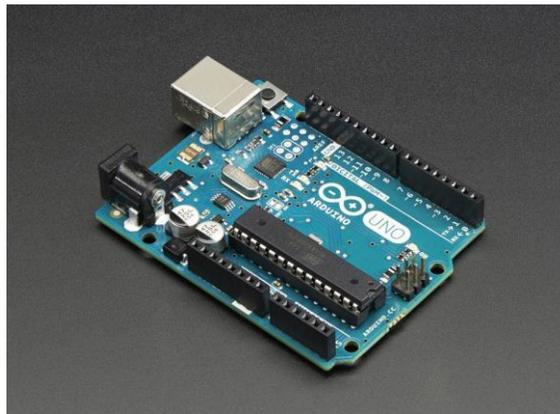


Figura 5.3. *Arduino Uno*

Su papel en este proyecto fue el de convertir la señal digital proveniente de *Pure Data*, en señal analógica que el dispositivo *Biotens* reproduce como impulsos eléctricos aplicados directamente al músculo del intérprete musical. *Biotens* es un estimulador del Sistema Nervioso con sistemas análogos y digitales; envía impulsos eléctricos al cuerpo a través de electrodos para aliviar y relajar los

músculos. Es utilizado en el tratamiento de espasmos musculares, para estimular la circulación sanguínea y prevenir la trombosis venosa. Mediante una intervención (hacking), fue posible obtener la señal proveniente del *Neurofeedback* vía *Arduino* para modular la intensidad de la estimulación muscular.



Figura 5.4 Estimulador Neuromuscular *Biotens*

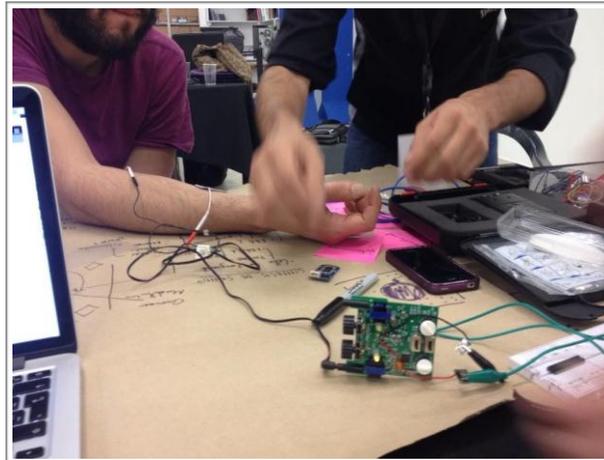


Figura 5.5. Hacking del *Biotens* vía *Arduino* (*MusicMakers Hacklab 2015*)

5.2 RESULTADOS

Se toman como resultados el diseño del performance, las dos presentaciones del mismo y el cuerpo de programas, datos, audio y video recolectados durante el proceso de composición de la obra y la presentación misma.

En *Irruptio* hay dos personajes: un intérprete de violonchelo y un artista corporal. La artista corporal porta un sensor *NeuroSky Mindwave* cuyas ondas cerebrales son enviadas a una computadora central, encargada de procesar los datos y redirigirlos a otros dispositivos y programas para intervenir tres procesos a través de señales OSC en tiempo real. Estos procesos son:

1. Procesamiento de audio en tiempo real del sonido del Violonchelo
2. Señal dirigida hacia el dispositivo *Biotens* colocado en el brazo de la intérprete
3. Señal para visualización en tiempo real de los niveles de atención captados por el dispositivo EEG

El esquema de la retroalimentación se representa en el siguiente diagrama de flujo:

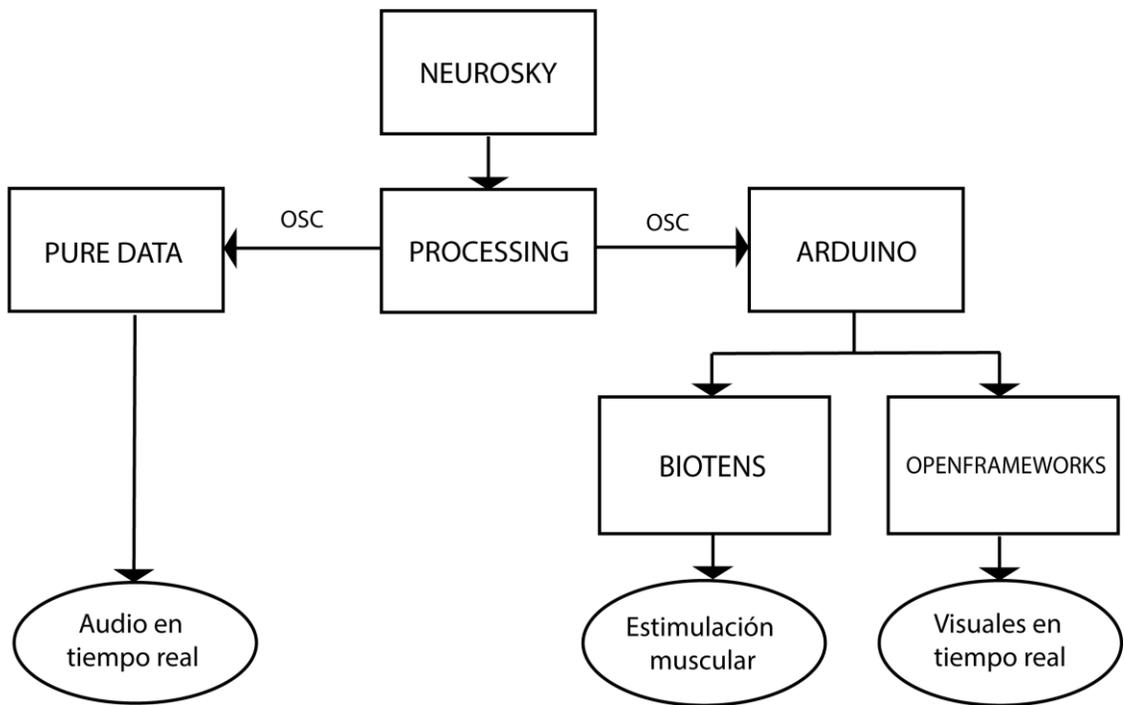


Figura 5.6 Diagrama de flujo de la señal en tiempo real del performance *Irruptio*

Desde ésta es posible enviar datos usando el protocolo OSC a otras de las computadoras en escena (nótese que puede convenir usar diferentes computadoras para algunas de las tareas, por ejemplo la síntesis de sonido en una y los visuales en otra). En una segunda ejecución de este *performance*, la artista corporal portaba también en sus manos dos dispositivos con acelerómetro (dos smartphones o ipods), que enviaban los datos de aceleración a través de la red usando el protocolo OSC. La intérprete del chelo tiene en su brazo izquierdo un estimulador muscular (EMS), que está intervenido con un Arduino, lo cual permite cambiar la intensidad del estímulo muscular desde el *software*. Se utilizó *PureData* con *Pduino* y *Firmata* con *Arduino* (usando el sketch *StandardFirmata*). *PureData* se utilizó

como *software* principal. En éste se re-codificó la señal encefalográfica, se produjo la síntesis de sonido y se distribuyó la señal a los distintos dispositivos utilizados.

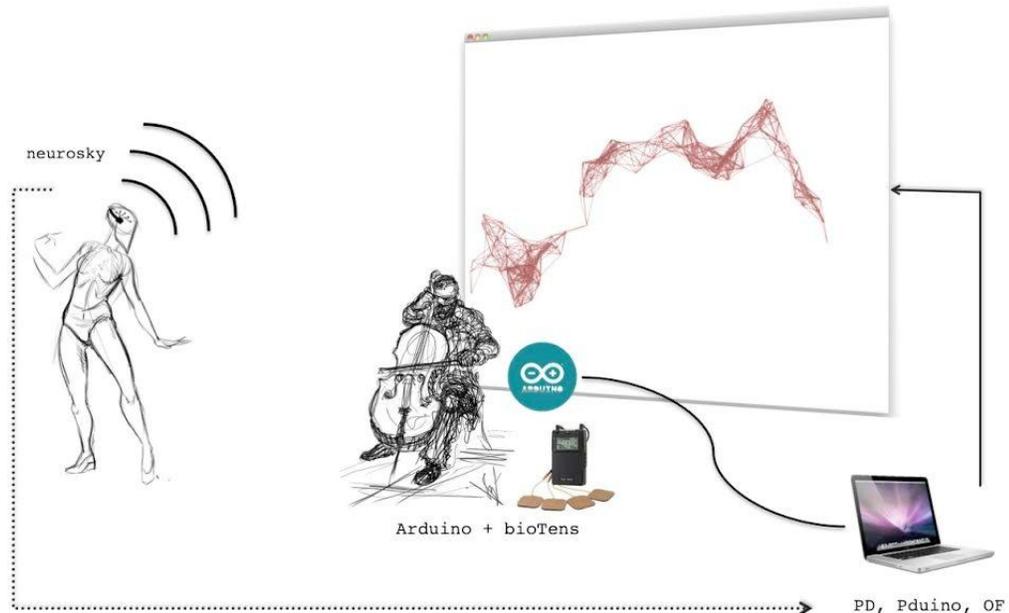


Figura 5.7 Procesamiento de señal en *Irruptio* (Sergio Bromberg, 2015)

SINTESIS DE SONIDO EN PUREDATA

Uno de los aspectos principales de la obra es el procesamiento del sonido del Cello modulado en tiempo real por la señal electroencefalográfica de la artista escénica. Como parte del diseño decidimos usar la síntesis por Modulación de Anillo (*Ring Modulation*), ya que consideramos el procesamiento apropiado para el timbre del instrumento y el tono general de la obra, ya que produce un efecto semejante a la distorsión. Todo el procesamiento de señal fue en tiempo real y usando el software libre *PureData*.

SINTESIS POR MODULACIÓN DE ANILLO (RING MODULATION)

En esta técnica de síntesis de sonido la amplitud de la onda portadora depende exclusivamente de la modulación, a diferencia de otros métodos de síntesis por modulación como la amplitud modulada o frecuencia modulada; si no existe la modulación no se produce ningún sonido. En la modulación por anillo simple, es espectro resultante contiene energía solo en las bandas laterales ($f_c - f_m$ & $f_c + f_m$) y la frecuencia original no estará presente. Esto hace que la modulación de anillo produzca una distorsión en la señal de salida. Debido a que en el dicha señal de salida no hay frecuencias fundamentales, no existirá una sensación definida de tono (Reck Miranda, 2002).

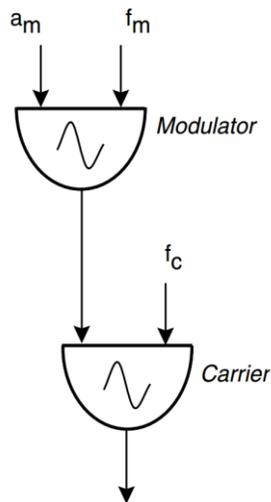


Figura 5.8 Esquema de la síntesis por modulación de anillo. (Reck Miranda, 2002).

En nuestro esquema de procesamiento de señal la señal proveniente del EEG se obtiene a través de datos OSC (Open Sound Control) proveniente del programa modificado para este proyecto de *Brainwave Visualizer* en *Processing*. El siguiente cuadro muestra parte del código que permite obtener la señal del *Neurosky Mindwave* como datos OSC.

```
// ESTA ES LA PARTE DEL CODIGO QUE MANDA OSC
myOscMessage = new OscMessage("/meditation");
myOscMessage.add(valorMed);
oscP5.send(myOscMessage, myBroadcastLocation);
// TERMINA

println("Atencion"+ Integer.parseInt(esense.getString("attention")));
println("Meditacion"+ Integer.parseInt(esense.getString("meditation")));
println("Meditacion"+ Integer.parseInt(esense.getString("meditation")));
}

JSONObject eegPower = json.getJSONObject("eegPower");
if (eegPower != null) {
  channels[3].addDataPoint(Integer.parseInt(eegPower.getString("delta")));
  myOscMessage = new OscMessage("/delta");
  myOscMessage.add(Integer.parseInt(eegPower.getString("delta")));
  oscP5.send(myOscMessage, myBroadcastLocation);

  channels[4].addDataPoint(Integer.parseInt(eegPower.getString("theta")));
  myOscMessage = new OscMessage("/theta");
  myOscMessage.add(Integer.parseInt(eegPower.getString("theta")));
  oscP5.send(myOscMessage, myBroadcastLocation);

  channels[5].addDataPoint(Integer.parseInt(eegPower.getString("lowAlpha")));
  myOscMessage = new OscMessage("/lowAlpha");
  myOscMessage.add(Integer.parseInt(eegPower.getString("lowAlpha")));
  oscP5.send(myOscMessage, myBroadcastLocation);

  channels[6].addDataPoint(Integer.parseInt(eegPower.getString("highAlpha")));
  myOscMessage = new OscMessage("/highAlpha");
  myOscMessage.add(Integer.parseInt(eegPower.getString("highAlpha")));
  oscP5.send(myOscMessage, myBroadcastLocation);

  channels[7].addDataPoint(Integer.parseInt(eegPower.getString("lowBeta")));
  myOscMessage = new OscMessage("/lowBeta");
  myOscMessage.add(Integer.parseInt(eegPower.getString("lowBeta")));
  oscP5.send(myOscMessage, myBroadcastLocation);
}
```

Figura 5.9 Sección del código de *Processing* creado para enviar la señal del *Neurosky* a OSC

A continuación se muestran algunos de los objetos de *PureData* que se utilizaron para obtener la señal OSC del *Neurosky* y transformarla en una señal continua. Debido a la limitación del *hardware* de obtener un dato cada segundo, fue necesario simular una curva para darle continuidad a la señal a fin de poderla usar como moduladora.

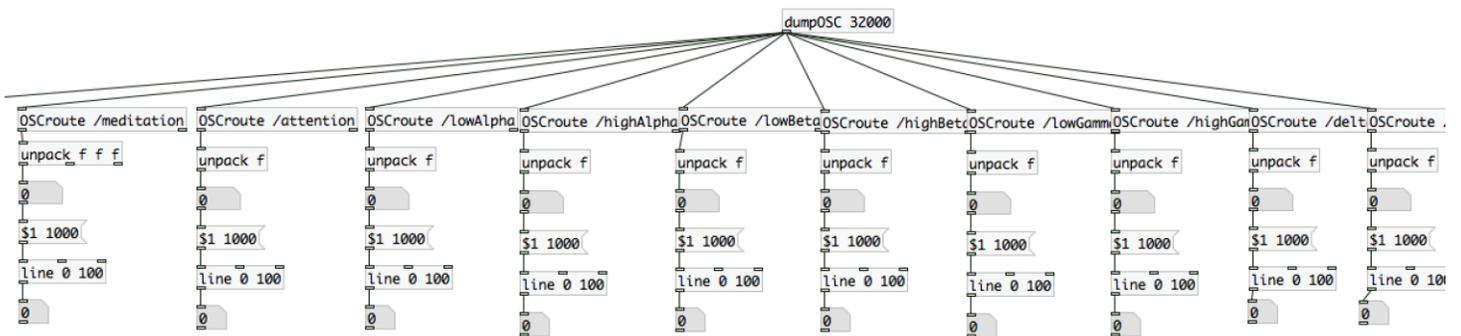


Figura 5.10. Fragmento del código de *PureData* que obtiene la señal OSC de Processing por cada banda del EEG y los procesos de atención y meditación.

En la figura anterior podemos observar como se obtienen los datos de las diferentes bandas del EEG (low alpha, high alpha, low beta, low gama, high gamma, theta y delta). También se obtienen del *Mindwave* la señal relacionada a los niveles de atención y meditación.

Dentro del performance *Irruptio*, se utilizaron principalmente la banda beta del EEG y los procesos de meditación y atención para modular parámetros de la síntesis por modulación de anillo, como la frecuencia de la modulación y la cantidad del efecto presente en la señal de salida. En la imagen pasada se observa los objetos que se utilizaron para re-escalar la señal a señales CC (Continuos Control) con un valor de 0 a 127, compatible con el protocolo MIDI.

La asignación de los valores del EEG y que parámetros de la síntesis por modulación de anillo iban a controlar no fue realizada al azar, sino que su elección fue parte del proceso de composición de la obra, por lo que se diferencia del concepto de *sonificación* (sonification) o de monitor sonoro (auditory display). De acuerdo con Hermann, Hunt y Neuhoff (2011), el uso de monitores sonoros se da para tener un mejor entendimiento de los cambios en los procesos subyacentes a los datos que refiere. La sonificación, es una parte de un monitor sonoro, es la técnica de convertir datos e interacciones en sonido.

En nuestro caso se uso la representación digital de la actividad eléctrica del cerebro de la bailarina como señal de control de ciertos parámetros de la síntesis que fueron asignados por los autores con el fin de lograr un sonido que enfatizara el tono del performance. Como lo mencionamos anteriormente, *Irruptio* habla de la disyunción en los procesos creativos generados en torno al uso de las nuevas tecnologías y de la relación entre tecnología digital y cuerpo. Es por esto que se decidió usar la síntesis por modulación de anillo, ya que genera un efecto parecido a la distorsión, que nos pareció una metáfora sonora adecuada. La asignación de parámetros se muestra de manera breve en el siguiente cuadro.

EEG	SINTESIS	VISUAL	MUSCULAR
Beta	Amplitud de la modulación		
Meditación	Intensidad del efecto		
Atención	Frecuencia de la modulación	X	X

Figura 5.13. Bandas del EEG y su uso en el performance *Irruptio*

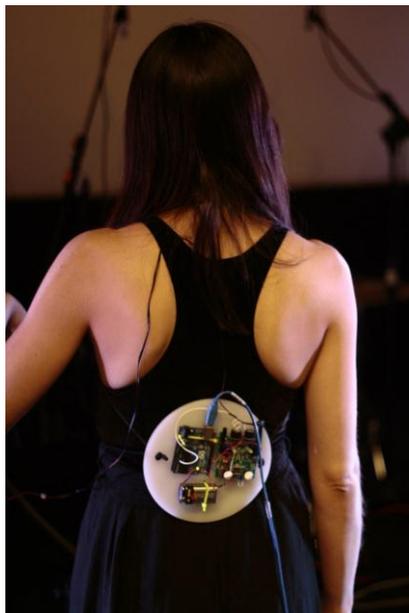


Figura 5.14 Intérprete con el estimulador *Biotens* colocado

Figura 5.15 Colocación de la placa *Arduino* y el estimulador *Biotens* en la espalda de la intérprete

Figura 5.16 Artista escénico con el sensor EEG y acelerómetros

Además de la modulación de parámetros de síntesis también se utilizó la señal para intervenir otros dos procesos en tiempo real. El primero de ellos como hemos mencionado se llevó a cabo estimulando el músculo braquiorradial y los extensores flexores del brazo izquierdo de la intérprete de cello. Esto provocaba un movimiento involuntario que modificaba la interpretación del tema musical. Paralelamente se tenía una visualización en tiempo real del proceso de atención, el cual era el responsable de la mayoría de las interacciones entre máquinas, programas y artistas escénicos. Este fue creado en *OpenFrameworks* por Sergio Bromberg. En la segunda presentación del performance llevada a cabo en el Centro de Cultura Digital, se hicieron algunos cambios respecto al diseño original. Arely Gómez fue substituida por la artista escénica Cinthya Dueñas y se incluyó el uso de acelerómetros que la bailarina activaba para detonar estimulación eléctrica adicional y se reforzó la visualización del nivel de atención proyectado para que emitiera una señal cada vez que se alcanzaba el umbral que disparaba la estimulación muscular en la intérprete.

6. DISCUSIÓN

En la obra *Irruptio* podemos encontrar elementos basados en las obras e investigaciones de los autores analizados en el capítulo 2: Alvin Lucier, Manfred L. Eaton y David Rosenboom. De Alvin Lucier y su obra *Music for Solo Performer*, se retoma el aspecto performático de la obra, el uso de un solo electrodo en la corteza prefrontal lo que en conjunto con las bandas alpha y beta del EEG, están relacionadas con los procesos de atención. De igual manera, el énfasis en la improvisación y la intervención en tiempo real de una instrumentación preestablecida fueron parte del proyecto *Irruptio* desde sus inicios. De la teoría de Manfred L. Eaton pudimos aplicar el paradigma de *biofeedback* aplicado a la composición de obras por medio de estados fisiológicos y psicológicos, en nuestro caso los procesos de atención y meditación. Manfred Eaton, al igual que Alvin Lucier hizo énfasis en el monitoreo biológico en tiempo real y además incluyó la generación electrónica de estímulos visuales y auditivos, a través de la síntesis de sonido, lo que aparece como tema central en *Irruptio* en conjunto con los visuales generativos en tiempo real los cuales buscan enfatizar el efecto de la señal electroencefalográfica en la interpretación. David Rosenboom también centró sus esfuerzos con el *biofeedback* en el proceso de atención, sin embargo sus procedimientos fueron más complejos que los de sus antecesores. Rosenboom creó un sistema de sonificación dependiente del proceso de la atención, cuyos componentes están presentes en la obra *Irruptio*:

1. Un mecanismo de generación musical acoplado a un sistema de síntesis de sonido:

En *Irruptio* el mecanismo de generación musical involucra se realiza con la interacción de la intérprete musical y el sistema de resíntesis en *PureData*.

2. Un modelo de percepción que detecta y predice los efectos perceptuales de los fenómenos que ocurren en una estructura musical generativa:

Utilizamos las mediciones *eSense* del *software* del dispositivo *Neurosky*, que utiliza la detección de Potenciales Relacionados a Acción (NRPs) para la detección de los cambios en los niveles de atención y meditación.

3. Una entidad perceptual e interactiva (el intérprete humano):

En nuestro modelo no tenemos una entidad perceptual e interactiva, sino dos: la intérprete de violoncello y la bailarina con el dispositivo EEG.

4. Un sistema de análisis e interpretación de las señales bio-eléctricas:

La recodificación de la señal en señales OSC que el sistema musical puede reconocer como señales de control se realiza en *Processing*.

5. Un mecanismo de control que ajuste y dirija la respuesta ante el sistema musical:

La programación del sistema de resíntesis de sonido en *PureData* dictamina y controla la manera en que las señales de control derivadas de la señal EEG van a intervenir el sonido del violoncello en tiempo real.

En el campo estético creemos que la obra logra simbolizar la problemática del control en diversos niveles. En un primer lugar expresa la relación humano-máquina desde una perspectiva de relaciones de poder. Los dispositivos digitales favorece lo que Deleuze llamó sociedades de control. Para Michel Foucault las relaciones de poder son bi-direccionales, ya que siempre encuentran una resistencia. Buscamos como intérpretes controlar a la máquina por medio de la interface, pero de igual manera la máquina a través de sus limitaciones/resistencia influye en el resultado, siendo éste usualmente muy diferente de lo esperado.

El *staff* de *MusicMakers Hacklab* DF describió la obra de la siguiente manera:

"Irruptio es un performance transdisciplinario que explora la díada voluntad/individualidad a través de la interacción a distancia entre un intérprete musical y una artista corporal. La interacción entre estos dos personajes ocurre a través de un sensor de encefalogramas, y se materializa en señales eléctricas conectadas a un estimulador muscular. En *Irruptio* se pone en jaque la idea de voluntad/individualidad. La frontera inquebrantable del ego es la potestad (o la ilusión de potestad) sobre el cuerpo y la mente. Aquí el intérprete pierde la potestad sobre su cuerpo por una acción ajena. Perder el control sobre los músculos es una experiencia incómoda y frustrante. A esta dimensión le aporta la acción mental y la acción a distancia: verse forzado por el contacto físico de otro es terrible, pero no parece irrevocable en el sentido de que a la fuerza del otro es posible oponer la propia. En esta pieza, en cambio, el otro no está: actúa a distancia a través de nuestra propia biología. Por este camino se sigue una reflexión bio-ética acerca de las fronteras de la manipulación del cuerpo y la mente: ¿hasta qué punto llevaremos el estudio del fortín último de nuestra intimidad -el cerebro- y qué haremos con ese conocimiento? En este sentido el uso del sensor de encefalogramas es interesante por su aporte metafórico. La ciencia está bastante lejos, por lo menos por ahora, de meter sus cables en nuestra psique, pero está allí analizando y categorizando nuestra impronta lingüística: nuestros rastros en la red, nuestras comunicaciones con el otro."

Dentro de las limitaciones del estudio, existieron algunas de carácter metodológico. Por la naturaleza del proyecto y por limitaciones del presupuesto nos enfocamos en trabajar con el dispositivo *Neurosky Minwave*, que si bien ha sido usado por otros compositores en diversas obras, tiene claras limitaciones en comparación con otros aparatos más nuevos o de mayor presupuesto. Desde que empezó el proyecto hasta la fecha, han aparecido nuevos y más confiables dispositivos de EEG, como el *EPOC EMOTIV* o el *Muse*. Sin embargo, es posible adaptar los resultados de la tesis para el uso con

los nuevos dispositivos. Es por eso que ponemos a la disposición de cualquier persona interesada, los diferentes programas desarrollados en nuestro repositorio de *github*.

Por otro lado, pensamos que es posible integrar otros tipos de bio-señales, las cuales podrían complementar a el uso de las ondas electroencefalográficas. Entre ellas podríamos plantear el uso de señales biológicas como la frecuencia cardiaca, presión arterial, respuesta galvánica de la piel, movimientos oculares, entre otras.

Finalmente, creemos que el presente estudio puede tener aplicaciones en otras áreas del conocimiento, en particular la neuropsicología y la cognición musical. El entrenamiento necesario para poder operar el sistema musical y audiovisual a través del *Neurofeedback* puede incrementar la capacidad del participante en sus procesos de atención y meditación. La magnitud y eficacia de estos cambios, bien podrían ser el objeto de estudio de otra investigación. Esperamos que a través de la comunidad de código abierto, el trabajo pueda ser retomado por las personas interesadas en las interfaces cerebro-computadora, el arte sonoro y el arte intermedia.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Baptista, L.F., y Keister, R.A. (2005). Why birdsong is sometimes like music. *Perspectives in Biology and Medicine*. 48:426-43.
2. Bauman, Zygmunt. (2002). *Modernidad Líquida*. Fondo de Cultura Económica: Buenos Aires.
2. Braverman, E. (1990) Brain Mapping: a short guide to interpretation, philosophy and future. *Journal of Orthomolecular Medicine*, 5(4), 189-197.
3. Cox, Christopher. (2003). *Undercurrents: The Hidden Wiring of Modern Music*. Continuum : London.
4. Darwin, Charles. (2009). *El origen del hombre*. Critica: Madrid.
5. De Pedro, Dionisio. (2008). *Teoría completa de la música*. Real Musical: Madrid.
6. Dodge, C. & Jerse, T. (1997). *Computer Music: synthesis, composition and performance*. Schirmer: Estados Unidos de America.
7. Dunn, David. (1992). *A History of Electronic Music Pioneers*. Extraído de: *Eigenwelt der Apparatewelt: Pioneers of Electronic Art*. Arz Electronica: Linz, Austria.
8. Everett, D. L. (2005). Cultural constraints on grammar and cognition in Piraha: Another look at the design features of human language. *Current Anthropology*, 46: 621-646.
9. Gardner, Michael. (2011). *Music for Solo Performer by Alvin Lucier: Current Trends in Brainwave Sonification*.
10. Goldberg, Avi. (2012). *The Feasibility of Consumer Grade EEG Devices as Computer Input*. *Proceedings of The National Conference On Undergraduate Research (NCUR)*. Weber State University, Ogden Utah.
10. Hammond, D.C. (2006). *What is Neurofeedback? Journal of Neurotherapy*, 10:4,11.

11. Heinrich, H., Gevensleven, H. & Strehl, U. (2007) Neurofeedback: train your brain to train behavior. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48:1, 3-16.
12. Herman, T., Hunt, A. & Neuhoff, J. (2011). *The Sonification Handbook*. COST Office: Berlin.
13. Imrama. (n.d) Disponible en: <http://www.immrama.org/eeg/electrode.html>
14. Kerckhove, Derrick. (1999). *La Piel de la Cultura: Investigando la nueva realidad electrónica*. Gedisa: Barcelona.
14. Koelsch, S., Gunther, T., Wittfoth, M. y Sammler, D. (2005). Interaction between Syntax Processing in Language and in Music: an ERP Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 17 (10): 1565-77.
15. Lucier, Alvin. (1982). *Music for Solo Performer*. Lovely Music.
16. Lucier, Alvin. (1995). *Reflections: Interviews, Scores, Writings*. Cologne: Musiktexte. p. 12
17. Lucier, Alvin. (1981). *I Am Sitting In A Room*. Lovely Music, Ltd.
18. Mignone, Christof. (2003). A History of Unsound Art. *S:On: Sound in Contemporary Canadian Art*. p. 81.
19. Miranda, E. R.(2006). Brain-Computer music interface for composition and performance. *International Journal of Disability and Human Development*; 5(2). Freund Publishing House Limited.
20. Morley, I. (2003). *The Evolutionary Origins and Archeology of Music: An Investigation into the Prehistory of Human Musical Capabilities and Behaviour*. Tesis Doctoral, University of Cambridge.
21. Neubauer, J. (1986). *The Emancipation of Music From Language: Departure From Mimesis in Eighteenth-Century Aesthetics*. New Haven, CT: Yale University Press.
22. Kropotov, J.D. (2009). *Quantitative EEG, Event-Related Potentials And Neurotherapy*. San Diego : Elsevier Inc.
23. Lukas, S.E., Mendelson, J.H., Kouri, E., Bolduc, M. & Amass, L. (1990). Ethanol induced alterations in EEG alpha activity and apparent source of the auditory P300 evoked response potential. *Alcohol*, 7(5), 471-477.
24. Plass-Oude Bos, D., Reuderink, B., Laar, B., Gurkok, H., Mühl, C., Poel, M. (2010). *Human Computer Interaction for BCI Games: Usability and User Experience*, Los Alamitos: IEEE Computer Society Press.
25. Rangaswamy, M., Porjesz, B., Chorlian, D.B., Wang, K., Jones, K., Bauer, L.O., et al. (2002) Beta power in the EEG of alcoholics. *Biological psychiatry*, 52(8), 831-842.

26. Reck Miranda, E. (2002). *Computer Sound Design: synthesis techniques and programming*. Focal Press: Oxford.
27. Richta, Radovan (1976). *La civilización en la encrucijada*. Editorial Artiach: Madrid.
28. Risset, Jean-Claude (). *Computer Music: Why*.
29. Rocha Iturbide, M. (1995). Desdoblado el objeto sonoro natural a través de la música electroacústica. Artículo presentado en la conferencia mundial de ecología acústica "The tuning of the world" en Banff, Canada, en 1993. Publicado en la revista Pauta Enero-Junio de 1995, 53-54. Cenidim INBA, México D.F.
30. Roederer, Juan G. (2008). *The Physics and Psychoacoustic of Music: An Introduction*. Springer: New York.
31. Rogalsky, Matthew. (2010). Nature as an Organizing Principle: Approaches to chance and the natural in the work of John Cage, David Tudor and Alvin Lucier. *Organized Sound*. Vol 15:2 p. 133-136.
32. Rosenboom, D, (1997). *Extended Musical Interface with the Human Nervous System: Assesment and Prospectus*. International Society for the Arts, Science and Technology: San Francisco.
- Russollo, Luigi. (2004). *The Art of Noise: Futurist Manifesto*. Ubuclassics. p. 5.
- Samson, Jim. (1993). *Music in Transition: A Study of Tonal Expansion and Atonality, 1900-1920*. Dent : London.
33. Schaeffer, Pierre. (2003). *Tratado de los objetos musicales*. Alianza Música: Madrid.
34. Smalley, Dennis (1997). Spectromorphology: explaining sound shapes. *Organized Sound* 2(2): 107-
35. Sundaram, M., Sadler, R.M., Young, G.B. & Pillay, N. (1999). EEG in Epilepsy: Current Perspectives. *The Canadian Journal of Neurological Sciences*, 26(4), 255-262.
36. Universe-review.ca (n.d.) A review of the Universe. Disponible en: <http://universe-review.ca/I10-80-prefrontal.jpg>
37. Velazquez Fernandez, Hector. (2009). Transhumanismo, Libertad e Identidad Humana . *Thémata. Revista de Filosofía*. Número 41: 577-590.
38. Wessel, David L. (1979). El espacio tímbrico como estructura de control musical. *Computer Music Journal*. 3(2): 162-72.

39. Wishart, Trevor. (1998). *On Sonic Art*. Amsterdam: Harwood Academic Publishers. p. 158-159.
40. Zhang, Y., Chen, Y., Bressler, S.L. & Ding, M. (2009) Response preparation and inhibition: The role of the cortical sensorimotor beta rhythm. *Neuroscience*, 156(1), 238-246.