
Diseño e Implementación de un Sistema Generador de Pulses Binaurales para el Estudio del Impacto de los Pulses en la Calidad de Sueño

Luis André Guerrero Sifontes



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Diseño e Implementación de un Sistema Generador de Pulses
Binaurales para el Estudio del Impacto de los Pulses en la
Calidad de Sueño**

Trabajo de graduación presentado por Luis André Guerrero Sifontes
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020

Vo.Bo.:

(f) _____
Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

Tribunal Examinador:

(f) _____
Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

(f) _____

(f) _____

Fecha de aprobación: Guatemala, de de 2020.

Prefacio

Este trabajo es dedicado a mis padres, los cuales con mucho esfuerzo me han dado todo lo que necesito para concluir mis estudios y que siempre han estado presentes en momentos difíciles, igualmente a mis hermanos que a lo largo de mi vida han tenido que soportar mi forma de ser. Este trabajo es la finalización de una etapa importante en la vida de cualquier persona, la cual es la Universidad. Agradezco de igual manera a todos mis compañeros de carrera, que, a lo largo de la misma me han ayudado a no rendirme en el proceso de estudios que se ha llevado a cabo por los últimos 5 años. También quiero agradecer al Dr. Luis Rivera quién es mi asesor de tesis, el cual me ha hecho exigirme mucho más que en cualquier otro curso de la Universidad, y también por tomarse el tiempo de que este trabajo sea realizado de la mejor manera posible. Finalmente agradezco a Dios, por darme una razón para creer en algo más que no sea mi propio beneficio.

Yo como escritor de esta tesis, sufro de afecciones del sueño desde que ingresé a la Universidad, debido a que mi ciclo del sueño es bastante irregular, tanto por la Universidad como mis mismos hábitos, debido a esto me cuesta un poco conciliar el sueño algunas veces, entonces al momento el cual se me ofrece este trabajo no dude en tomarlo, no solo por las afecciones que yo sufro, sino que entiendo las dificultades que estas situaciones pueden ocasionar en distintas personas.

En la presente tesis se busca que los estudios universitarios, que se llevaron a cabo desde 2016, den frutos y de ellos se obtenga un trabajo el cual no solo ayude a concluir los estudios antes mencionados, sino que con los conocimientos adquiridos y el trabajo realizado, poder ayudar de una manera ingenieril y social para que las demás personas se beneficien del presente trabajo.

Prefacio	III
Lista de figuras	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
5. Alcance	6
6. Marco teórico	7
6.1. Señales EEG	7
6.2. Etapas del sueño	9
6.3. Ondas Sonoras	11
6.3.1. Interpretación Física de las Ondas Sonoras	11
6.3.2. Interpretación Neuronal de las Ondas Sonoras	12
6.4. Pulses Binaurales	15
6.5. Formatos Digitales de Sonido	16
6.5.1. Archivos .ogg	17
6.5.2. Archivos .wav	17
7. Implementación de Generador de Pulses Binaurales en Raspberry Pi 3	19
7.1. Familiarización con Python en Raspberry Pi 3	19
7.1.1. Raspberry Pi	19
7.1.2. Python	20
7.2. Migración de Programa	21

7.2.1. Problemática de Reproducción de Sonido entre Python y Raspberry Pi	22
7.2.2. Resolución Problemas de Reproducción de Sonido	23
7.3. Evaluación Funcionamiento de Programa	25
8. Interfaz Gráfica	29
8.1. Herramientas utilizadas para la Interfaz Gráfica	29
8.1.1. Pantalla Táctil 7”	29
8.2. Tkinter	31
8.3. Desarrollo de Interfaz Gráfica	31
8.3.1. Creación de etiquetas y botones	31
8.3.2. Versión 1 Interfaz Gráfica	32
8.3.3. Versión 2 Interfaz Gráfica	33
8.3.4. Ajuste de la interfaz a la Pantalla LCD	35
8.3.5. Página de Inicio	35
8.3.6. Sub Menu	36
8.3.7. Generar Audio	36
8.3.8. Reproducción de Audio	38
8.3.9. Implementación multi-hilos	39
9. Efectos de los pulsos Binaurales en la Calidad del Sueño	41
9.1. Frecuencias centrales y diferencia de tonos no idóneos	41
9.2. Pruebas Frecuencia Central de Pulses Binaurales	42
9.2.1. Frecuencia central 1000 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz	43
9.2.2. Frecuencia central 500 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz	43
9.2.3. Frecuencia central 250 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz	43
9.2.4. Frecuencia central 100 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz	44
9.2.5. Frecuencia Central 50 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 20 Hz	44
9.2.6. Opiniones Generales de Frecuencia Central	44
9.3. Pruebas con Frecuencia de Pulso Binaural	45
9.3.1. Frecuencia Central 175 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 1 Hz	45
9.3.2. Frecuencia Central 175 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 5 Hz	45
9.3.3. Frecuencia Central 175 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 15 Hz - 50 Hz	45
9.3.4. Condiciones de Trabajo	46
9.4. Conclusiones Generales: Frecuencia Central y Frecuencia de pulso Binaural . .	46
10. Conclusiones	48
11. Recomendaciones	49
12. Bibliografía	50

Lista de figuras

1.	Tipos de señales EEG [5]	9
2.	Señales EEG etapa REM [9]	10
3.	Señales EEG etapa NREM [9]	10
4.	Hipnograma de persona saludable [10]	11
5.	Rango Audible de Frecuencias y su nivel de presión sonora en dB [11].	12
6.	Órganos del sistema nervioso para la interpretación del sueño [12]	13
7.	Diagrama pulso binaural [13]	16
8.	Diagrama de flujo explicativo de etapas de implementación de código a Raspberry	19
9.	Fotografía Raspberry Pi [18]	20
10.	Salida generador de Pulses Binaurales	21
11.	Archivo .wav	21
12.	Código para reproducir archivo de audio	22
13.	Error al utilizar archivo .wav	22
14.	Prueba de reproducción con VLC Media Player	23
15.	Prueba de reproducción con VLC Media Player	24
16.	Archivo OGG generado	24
17.	Pulso Binaural obtenido	25
18.	Pulso Binaural obtenido (1 s)	26
19.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Derecho	27
20.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Izquierdo	27
21.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Pulso Binaural	28
22.	Conexiones de Raspberry Pi a Pantalla Táctil de 7"	30
23.	Vista de Frente Sistema Pantalla Táctil-Raspberry	30
24.	Ventana principal prototipo	32
25.	Ventana secundaria prototipo	33
26.	Botones principales prototipo	33
27.	Botones principales prototipo	34
28.	Botones principales prototipo	34
29.	Botones principales prototipo	34
30.	Ventana principal de Interfaz Gráfica	35

31.	Sub Menu de Interfaz Gráfica	36
32.	Generar Audio de Interfaz Gráfica	37
33.	Ventana de Generación de Audio Interfaz Gráfica	38
34.	Seleccionar Audio de Interfaz Gráfica	39

Resumen

El presente trabajo se llevó a cabo debido a los distintos trastornos del sueño que sufre una buena porción de la población en la actualidad. Existen varios factores que afectan nuestra calidad de sueño, tales como el estrés, presión, entre otros.

Independientemente de los factores que causan el problema, en este trabajo se planteó explorar una posible solución, la cual es la utilización de Estimulación por Pulsos Auditivos (ABS, por sus siglas en inglés - *Auditory Beat Stimulation*). ABS consiste en pulsos auditivos que estimulan las señales Electroencefalográficas (EEG) del cerebro, de manera que puedan afectar positivamente tanto la cognición de las personas como la calidad del sueño de las mismas.

De los distintos pulsos ABS, este trabajo se enfocó en los llamados pulsos binaurales. Estos pulsos son el resultado de una interpretación del cerebro, que sucede cuando dos fuentes de sonido, a frecuencias distintas, se colocan en cada uno de los oídos. La meta de este trabajo fue poder replicar pulsos binaurales en un dispositivo compacto y de bajo costo, y también cómodo y fácil de usar para los usuarios.

Luego de tener un prototipo funcional de replicación de pulsos binaurales, se realizaron pruebas con algunos individuos, para obtener la opinión que ellos tienen acerca de los pulsos y cómo estos afectan el sueño. Se espera que el prototipo y los resultados preliminares sirvan como punto de partida para estudios más profundos sobre la calidad del sueño y su posible corrección.

Abstract

This thesis was carried out due to the different sleep disorders suffered by a good portion of the population today. There are several factors that affect our quality of sleep, such as stress, pressure, among others.

Regardless of the factors that cause the problem, in this thesis it was proposed to explore a possible solution, which is the use of Auditory Pulse Stimulation (ABS). ABS consists of auditory pulses that stimulate Electroencephalographic (EEG) signals from the brain, so that they can positively affect both people's cognition and the quality of their sleep.

Of the different ABS pulses, this thesis focused on the so-called binaural pulses. These pulses are the result of an interpretation of the brain, which occurs when two sources of sound, at different frequencies, are placed in each of the ears. The goal of this work was to be able to replicate binaural beats in a compact and low-cost device, which is also comfortable and easy to use for users.

After having a functional prototype of binaural pulse replication, tests were carried out with some individuals, to obtain the opinion they have about the pulses and how they affect sleep. The prototype and preliminary results are expected to serve as a starting point for more in-depth studies on sleep quality.

CAPÍTULO 1

Introducción

El trabajo realizado desarrolló un prototipo que busca mejorar la calidad del sueño de las personas, ya que muchas personas sufren distintos trastornos que no les permiten conciliar el sueño de la mejor manera posible. Según investigaciones realizadas en el ámbito científico los pulsos binaurales, podrían mitigar algunas de las afecciones de sueño de las personas.

Teniendo un dispositivo fácil de utilizar (en este caso se utilizó una Raspberry Pi, adaptado con una pantalla táctil de 7 "), se busca reproducir pulsos binaurales que logren estimular el cerebro de manera tal, que la persona que sea expuesta a estos pulsos sea capaz de dormir más plácidamente. Esto ocurre cuando la persona escucha estos pulsos binaurales. La mejor manera de escuchar los mismos es por medio de audífonos conectados a alguna fuente de sonido. El sonido al cual el usuario esté expuesto debe de ser *surround*, ya que esto influye a la hora de oír los pulsos binaurales.

El trabajo se divide en tres etapas. La primera, tomando en consideración el trabajo previo de José Pablo Muñoz en [1] se origina la tarea de adaptar lo realizado por el estudiante a la Raspberry Pi. Luego de haberse adaptado el trabajo anterior, se desarrolló una interfaz gráfica amigable con el usuario, para poder generar y reproducir los pulsos binaurales con las especificaciones deseadas por el usuario. Finalmente se hizo una evaluación la cual mide de manera cualitativa la calidad del sueño de las personas al momento de ser expuestas a pulsos binaurales al momento de dormir, para poder comprobar que este tipo de excitación sonora puede ayudar a los distintos trastornos de sueño.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

Este trabajo es la continuación de la tesis realizada por el estudiante José Pablo Muñoz [1], la cual se basaba en varios aspectos de las etapas del sueño y observar cómo estas se ven afectadas por distintos estímulos, así como la clasificación de las etapas por medio de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*).

En el caso del trabajo anterior se utilizó una computadora portátil para generar pulsos binaurales que afectan las etapas de sueño. Los pulsos binaurales se generan digitalmente, seguidamente se transmite el sonido al sujeto de prueba por medio de auriculares. Lo que se busca en este trabajo es encontrar una manera más conveniente y eficiente de generar y transmitir estos pulsos, por medio de un dispositivo más compacto y menos costoso, como una RaspberryPi.

El trabajo de José Pablo Muñoz tiene un espectro de estudio más general, debido a que en este se trabaja en la reproducción de los pulsos binaurales, y la lectura e interpretación de las señales EEG. En el caso de esta tesis, la misma se centrará mayormente en la reproducción efectiva de los pulsos binaurales.

Los pulsos binaurales son una “ilusión” cerebral, ya que estos son la interpretación que el cerebro le da a dos sonidos con frecuencias distintas, cada una en las dos terminales auditivas del ser humano. Muchas veces estos pulsos son utilizados para modificar la cognición, y estados de ánimo de las personas, ya que los mismos afectan las ondas cerebrales que están estrechamente relacionadas con las etapas del sueño. Esto ha llevado a científicos en el mundo a investigar este fenómeno para poder investigar las nuevas aplicaciones que pueden tener estas señales.

Estudios recientes en [2] indican que los procedimientos ABS han llegado a afectar a la creatividad, atención y memoria de las personas. Estos estudios concluyen que los procedimientos pueden ser utilizados para potenciar la cognición e incluso alterar el sentido del humor.

Otro estudio bajo la misma linea de procedimientos ABS y pulsos binaurales, más enfo-

cado en el área del sueño [3], indica que es posible lograr inducir las señales EEG necesarias para el sueño, siempre que el sonido utilizado no sea molesto para los sujetos de prueba.

CAPÍTULO 3

Justificación

Muchas personas sufren trastornos del sueño. Según [4], aproximadamente el 6.5 por ciento de la población sufre apnea, 34 por ciento ronca, aunque solo 16.4 por ciento lo hace frecuentemente. Además, en poblaciones como la mexicana, por ejemplo, el 30 por ciento de la población sufre trastornos del sueño, lo cual es un porcentaje significativo. Normalmente, estos tipos de padecimientos no son tratados, y llegan a afectar de manera significativa la vida de las personas, debido a que un buen descanso está directamente relacionado con la productividad de las mismas.

Por todo lo antes mencionado, se quiere explorar un área que puede llevar a una solución. Como se indicó anteriormente, los pulsos binaurales pueden tener un efecto en el sueño, por lo que se propuso crear un dispositivo fácil de usar y de bajo costo que replique estos pulsos. El dispositivo puede ser muy útil en futuros estudios de análisis de sueño.

Generalmente, para controlar las enfermedades del sueño, se utilizan variedad de medicamentos que muchas veces ayudan a lograr conciliar el sueño pero tienen efectos secundarios los cuales no son deseados por los usuarios. El uso de pulsos binaurales puede ayudar a tratar enfermedades relacionadas con el sueño sin la necesidad de medicamentos.

CAPÍTULO 4

Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar un generador de pulsos binaurales compacto y de bajo costo, que permita estudiar los efectos de los pulsos en la calidad de sueño de las personas.

Objetivos Específicos

- Optimizar el algoritmo de generación de pulsos binaurales desarrollado en la fase previa del proyecto.
- Implementar el algoritmo de generación de pulsos en un dispositivo compacto y de bajo costo.
- Diseñar e implementar una interfaz de usuario que permita configurar y generar los pulsos de forma fácil y eficiente.
- Diseñar un protocolo para la aplicación de los pulsos binaurales de forma segura, y para la evaluación del impacto de los pulsos en la calidad del sueño de las personas.

CAPÍTULO 5

Alcance

El alcance de este proyecto es lograr un dispositivo pequeño en el cual el usuario que logre replicar eficazmente pulsos binaurales, esto implica también que los usuarios puedan utilizar fácilmente el dispositivo con la aplicación correspondiente. Para lograr esto se desarrolló tanto una aplicación sencilla de utilizar para el usuario como un manual de usuario que indica a detalle como funciona cada uno de los módulos del programa.

Este proyecto no busca resolver los trastornos del sueño, busca la implementación del dispositivo antes mencionado, para poder reproducir los pulsos, y definir un rango en el cual los mismos induzcan al sueño de mejor manera. Para esto se generó un protocolo el cual determina los rangos de frecuencias de los pulsos que impactan de mejor manera el sueño.

Para trabajos futuros se podría implementar la lectura de señales EEG que son generadas al momento de dormir, y poder inducir a las mismas con distintos pulsos binaurales, este sería un trabajo de integración en el que se unen dos tesis trabajadas en paralelo.

CAPÍTULO 6

Marco teórico

6.1. Señales EEG

Las señales electroencefalográficas (EEG), son causadas por los pulsos eléctricos generados por el cerebro, hay 5 clases de señales EEE, cada una con distintas características[5], que serán explicadas a continuación.

El interés de investigar las señales es que el cerebro es el órgano que envía instrucciones a los demás órganos para que estos realicen sus actividades adecuadamente. Se sabe que ciertas partes del cerebro controlan ciertos movimientos de partes del cuerpo. Dependiendo del lugar del cerebro que estemos recibiendo las señales, podemos tener una noción de las instrucciones que este está enviando[6].

A cada una de estas señales se les asigna el nombre de letra griega dependiendo de la frecuencia de las mismas, y se clasifican de la misma manera por rangos de frecuencias. Estos rangos de frecuencias indican mayor o menor actividad cerebral dependiendo de la frecuencia a las cuales estas señales sean generadas. La amplitud de este tipo de ondas puede variar entre valores de unos pocos micro-voltios hasta llegar a valores de 1 milivoltio[7].

A grandes rasgos podemos separar estas señales como:

- Frecuencias lentas (Delta y Theta)
- Frecuencia alfa
- Frecuencias rápidas (Gamma)

El espectro de frecuencia que las señales EEG abarca son de 1-30 Hz en su mayoría, pero a continuación se describirán los distintos espectros para los distintos tipos de señales que tiene el cerebro.

Delta: Tiende a ser la señal más lenta (0.1 - 4Hz), pero con mayor amplitud comparada a las demás, generalmente estas señales se dan por actividad en el lóbulo frontal del cerebro.

Normalmente este tipo de señales se dan específicamente cuando las personas se encuentran dormidas. Sobre todo tipo de señales EEG, toman mayor relevancia cuando el sueño es profundo, ya que estas señales pueden llegar a estar presentes en el 50 por ciento de esta etapa del sueño. Este tipo de señales están presentes en todas las etapas del sueño, pero son más notorias en el caso de el sueño profundo, cuando el sueño es superficial, este tipo de señales, conforman el 20 por ciento de las señales EEG [8].

Theta: De igual manera es una señal un poco lenta de 4 - 8 Hz, es normal este tipo de actividad en niños o en adultos durmiendo, pero no es común en adultos despiertos. Dependiendo de las señales y del individuo que las causa este tipo de señales puede llegar a diagnosticar lesiones subcorticales y encefalopatías. Contribuye a la hormona de crecimiento humano, y otras hormonas que ayudan a la memoria.

La morfología de la misma es diversa, es decir, este tipo de señales están compuestas por señales regulares e irregulares. Además, este tipo de actividad aumenta mientras las personas envejecen.

Alpha: Señales de 8 a 13 Hz, se presentan tanto en adultos como en niños, para el grupo de adultos tenemos que este tipo de señales se presentan cuando están relajados o bien con los ojos cerrados, se registran en la parte parietal y occipital del cerebro. Este tipo de señales contribuyen a la generación de serotonina que es un químico que relaja a los seres humanos.

Este tipo de señales son bastante regulares, lo que las hace bastante distinguibles a comparación de las otras señales EEG, incluso, llegando a tener un aspecto sinusoidal. La amplitud de las señales alpha varía generalmente de 20 a 60 micro voltios, aunque estos valores de amplitud pueden llegar hasta los 200 micro voltios sin estar relacionados con alguna patología.

Con respecto a la variabilidad de estas señales, con respecto a la frecuencia media de las mismas, es bastante constante, ya que se encuentran en un rango de ± 0.5 Hz.

Las ondas alpha suceden cuando las personas se encuentran en reposo, con los ojos cerrados sin realizar ningún tipo de actividad, debido a esto se cree que las mismas señales alpha están estrechamente relacionadas con el sistema visual.

Beta: Son señales rápidas mayores de 13-30 Hz, tienen que ver con actividades que hacen a la persona estar concentrada, causan la generación de cortisol en el cuerpo que es una hormona que acelera el cuerpo. Estas señales ocurren cuando el individuo está despierto ya que se necesita una gran actividad cerebral, generalmente de los lóbulos frontales y parietales.

La amplitud de este tipo de señales es bastante baja, debido a esto, no pueden ser captadas por métodos convencionales, esta amplitud puede variar en rangos desde 5 hasta 10 micro voltios, lo cual comparado a las otras clases de señales EEG es bastante baja.

Gamma: Son las señales más rápidas (30 - 100 Hz) causadas por el cerebro generalmente son causadas en situaciones de alerta extrema que hace que el individuo utilice dos sentidos al mismo tiempo para lograr su objetivo.

Ya habiendo descrito los tipos de señales EEG, se presenta a continuación una figura con las características antes descritas de las 5 señales distintas:

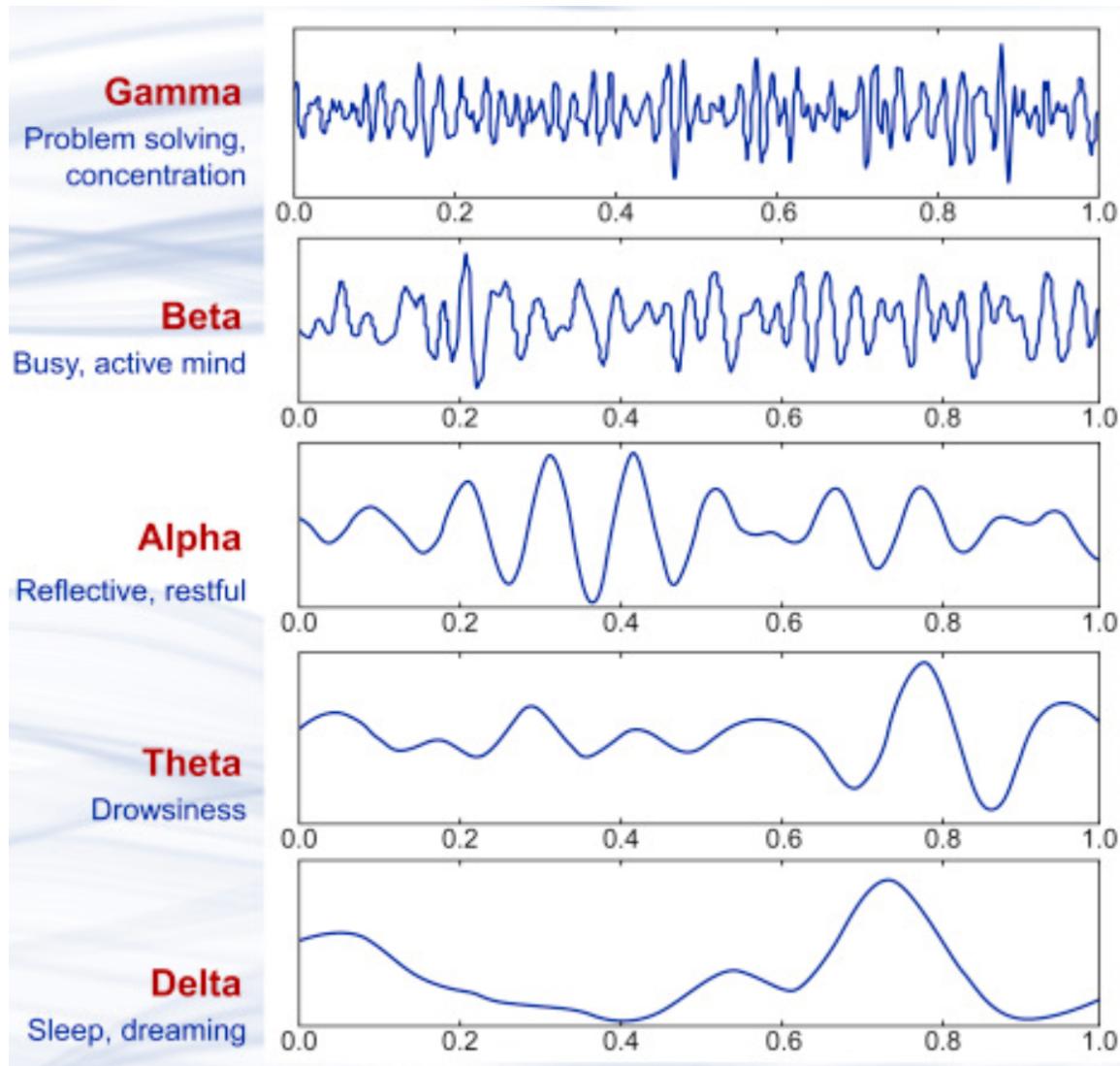


Figura 1: Tipos de señales EEG [5]

6.2. Etapas del sueño

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo el sueño es una parte vital en la vida de las personas, llegando a abarcar la tercera parte de nuestra vida.

El sueño está compuesto por 2 etapas, REM, que por sus siglas en inglés significa Movimiento rápido de los ojos, y NREM, que por sus siglas en inglés significa Movimiento no rápido en los ojos.

La etapa REM, es identificable por tener amplitudes más bajas y una frecuencia más rápida que está directamente relacionada con el movimiento de los ojos, cabe mencionar

que en esta etapa no se clasifica como sueño profundo, ya que se registra bastante actividad cerebral. Cabe mencionar que este movimiento de los ojos en la etapa es fuertemente relacionado a los sueños debido a que estudios que nos mencionan que muchas personas al ser despertada en esta etapa dicen haber soñado [9]. Otra situación interesante de esta etapa es que nuestros músculos de los brazos y piernas están temporalmente paralizados.

Seguidamente la etapa NREM, se puede dividir en 3 sub-etapas N1, N2, N3, en las cuales va decreciendo la velocidad de las señales EEG, teniendo frecuencias más bajas, esta etapa es fuertemente relacionada con las etapas más profundas del sueño.

Como podemos ver en las gráficas, entre las señales EEG tienen una frecuencia más baja, su amplitud aumenta, estas figuras muestran las distintas etapas tanto como la REM, como las distintas etapas de NREM.



Figura 2: Señales EEG etapa REM [9]

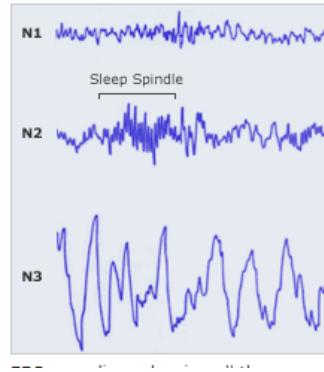


Figura 3: Señales EEG etapa NREM [9]

Otra manera de visualizar las etapas del sueño es por medio de hipnogramas, los cuales son representaciones de la actividad cerebral de las personas mientras están dormidas [10]. En estos se puede diferenciar los distintos ciclos que tiene el ser humano cuando duerme, variando entre ciclos NREM y REM. La mayoría de la actividad se registra en la etapa NREM, que está relacionada con el sueño más profundo, de igual manera se nota que las personas tienen ciclos en los cuales se despiertan naturalmente, como se ve en la siguiente gráfica :

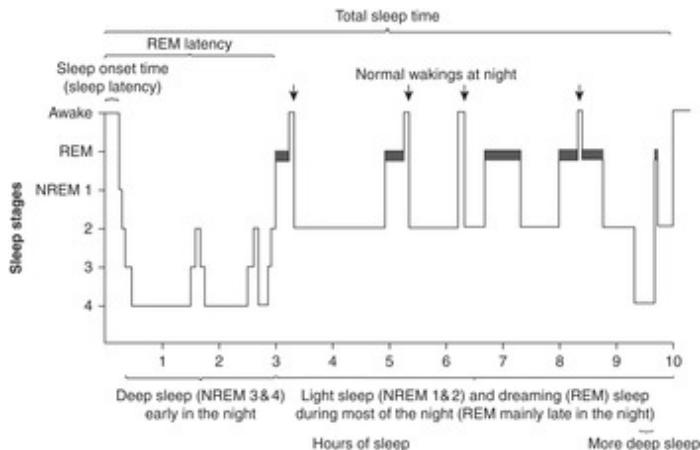


Figura 4: Hipnograma de persona saludable [10]

6.3. Ondas Sonoras

6.3.1. Interpretación Física de las Ondas Sonoras

El sonido, según [11], es producido debido a las vibraciones de presión externas al oído. Físicamente estas vibraciones, u ondas mecánicas, chocan con el tímpano, lo cual causa que se repliquen ondas de la misma frecuencia, obteniendo de esta manera la sensación de sonido.

Un oído normal, puede distinguir ondas de frecuencias desde los 16 Hz, hasta los 20,000 Hz, y la amplitud de umbral de audición y hasta que las mismas causen sensaciones de dolor. Hay que mencionar que en este caso, las frecuencias más bajas corresponden a sonidos más graves, mientras que frecuencias más altas son propias de sonidos más agudos, esto no tiene nada que ver con la amplitud de variación de presión, que es el rango en el cual los humanos podemos tanto percibir sonido como soportarlo.

De los conceptos mencionados anteriormente dos definiciones muy importantes que existen son:

- La onda sonora u onda mecánica que causa vibraciones en su medio
- La sensación de sonido que el oído tiene a la onda sonora antes mencionada

Hay que diferenciar estos dos conceptos, ya que el sonido como tal, parecido a la luz, es la interpretación de los sistemas biológicos del ser humano para poder entender de mejor manera el ambiente que lo rodea.

La sonoridad [11] (sensación de sonido) no puede ser medida por un aparato debido a que cada una de las personas tiene una percepción distinta al sonido, se pueden estar recibiendo las mismas ondas mecánicas, pero depende del organismo de cada persona como las va a percibir. El oído humano no tiene la capacidad de identificar la intensidad de un sonido "linealmente", si la intensidad de un sonido se duplica, el oído no tiene la capacidad para percibir ese incremento. La audición de los seres humanos tiene un tipo de comportamiento

logarítmico con relación a la intensidad de las ondas sonoras que percibe. Generalmente las ondas sonoras que percibe el oído humano son provocados por la unión de varios componentes sonoros, que tienen distintas frecuencias, y depende de la intensidad de cada uno de los componentes que tanto afecte a la onda sonora final (es decir entre más intensidad sonora tiene una onda, su componente en frecuencia, tenderá a oírse más).

Se debe de tener una manera efectiva, la cual nos indique el rango auditivo, de las personas las cuales tienen una audición normal. Esto se logra generando algunas curvas que nos muestran el espectro audible del ser humano, tanto en frecuencia como en intensidad acústica, como se mencionó anteriormente el oído humano tiene la capacidad de percibir de 16 Hz a 20,000 Hz, mientras que el nivel de presión sonora (que se mide en dB) puede variar desde valores un poco menores de 0 hasta valores de 120-130. Cabe mencionar que hay valores mucho más altos de presión sonora, pero el oído humano no es capaz de soportarlos.

Con los conceptos previamente aclarados, se muestra la gráfica de espectro auditivo del ser humano, la cual demuestra el comportamiento de las ondas sonoras, dependiendo tanto de su frecuencia como de su presión sonora.

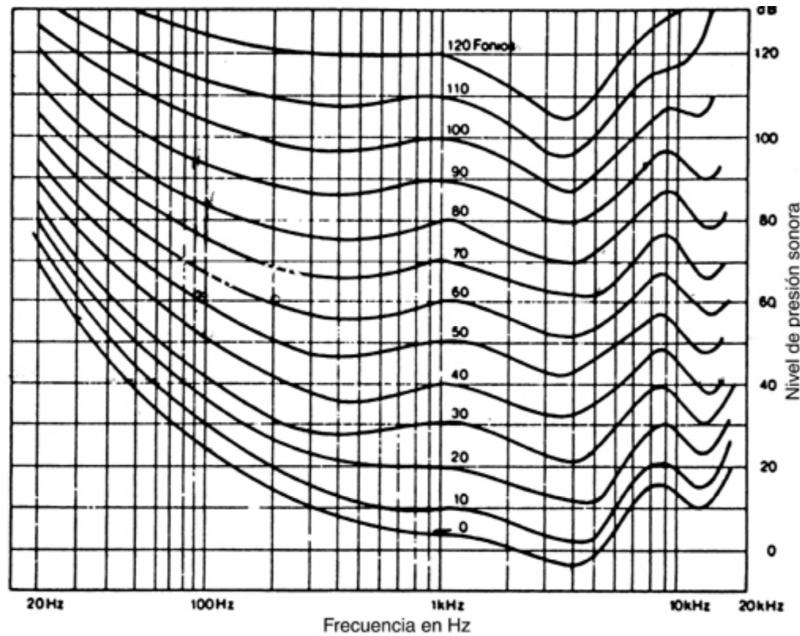


Figura 5: Rango Audible de Frecuencias y su nivel de presión sonora en dB [11].

6.3.2. Interpretación Neuronal de las Ondas Sonoras

En la sección anterior se ahondó sobre el tema físico de las ondas sonoras, de igual manera del oído y una breve descripción de como se replican las ondas sonoras, pero en esta sección se abordará en tema neuronal, y la interpretación que el sistema nervioso le da a las ondas sonoras que el tímpano recibe. Luego que el sonido es recibido por el tímpano, el sonido se transfiere por algunos órganos antes de ser interpretado por el sistema nervioso, llegando hasta la cloquea que es el órgano más grande (del sistema auditivo) y el encargado de conectarse al sistema nervioso, para la interpretación del mismo sonido.

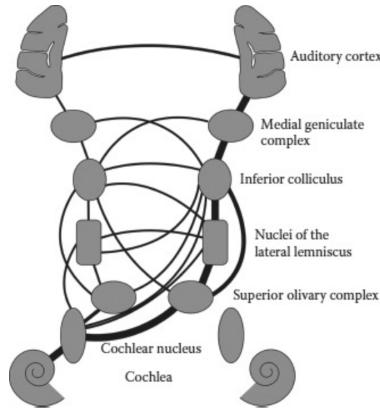


Figura 6: Órganos del sistema nervioso para la interpretación del sueño [12]

Teniendo una idea de que órganos están involucrados en la audición por parte del sistema nervioso, empezamos con que luego de que la cloquea recibe el sonido esta envía el mismo al núcleo cloquear, que, por conexiones nerviosas son transmitidas a distintas secciones del sistema Olivar en el cerebro, siempre considerando que estas tienen la interpretación de sonido que es proporcionada por la cloquea.

Una parte muy importante de para descifrar el sonido es el núcleo del sistema olivar, ya que este realiza el trabajo de ubicar la posición del sonido, ya que es el primer sistema nervioso el cual detecta el sonido y ya le da una interpretación, también cabe añadir que en núcleo cloquear se da la decodificación que le indica al cerebro la frecuencia e intensidad del sonido, obteniendo así información valiosa pero no tan procesada.

Tálamo Auditivo

Habiendo procesado la información el sonido llega a tálamo auditivo, el cuál está fuertemente controlado por el colículo inferior. Hay otros caminos que el sonido tiene para poder llegar a la corteza auditiva pero es mucho más fácil describir este comportamiento desde la respuesta y comportamiento del tálamo al sonido.

Podemos subdividir al tálamo auditivo en tres secciones las cuales cumplen distintas funciones(todas consideradas por sus siglas en inglés):

- MGv *ventral*
- MGd *dorsal*
- MGm *medial*

Con respecto a la primera sección del tálamo auditivo (MGv) esta se encarga de responder bien a los tonos de frecuencias puras, gracias a esta sección del tálamo la respuesta auditiva es bastante rápida logrando distinguir pulsos rápidos de estimulación. Además de las cuestiones antes mencionadas la MGv ayuda a ubicar la posición de la fuente del sonido.

Seguidamente MGd es la parte del tálamo encargada del reconocimiento de patrones en el sonido. Al contrario que la parte MGv encontramos que esta sección no reacciona de buena manera a los tonos puros, estas neuronas se especializan en tonos complejos los cuales contienen varias frecuencias, y juntos con MGv puede distinguir ese espectro de tonos, funcionando al mismo tiempo para distinguir distintos sonidos.

Finalmente con la sección MGm, la cual no contiene neuronas especializadas a tonos puros o a tonos complejos, sino que es una especie de híbrido entre ambos ,se cree que busca llenar el espacio en medio de los dos sistemas anteriores, por ejemplo cuando no es un tono tan complejo pero tampoco es un tono puro.

Corteza auditiva

Habiendo descrito las distintas partes del tálamos auditivo, se llega al final del sistema nervioso encargado de interpretar el sonido, con la corteza auditiva, en la cual el sonido ya puede ser memorizado y puede llegar a causar una reacción física, es la última parte del cerebro involucrada con la interpretación de sonido.

La corteza auditiva se puede dividir, entre áreas mayores, las cuales se ven definidas por distintos parámetros tales como:

- Conexiones
- Arquitectura
- Organización funcional

Habiendo definido el porque de las divisiones, nos topamos con que las divisiones son(se utilizaran los términos en inglés a los cuales no se les encontró una traducción idónea):

- *Core*
- *Belt*
- *Parabelt*

El *Core* recibe información directa desde las neuronas de MGv y recibe alguna información de las neuronas de MGm, esta área de la corteza auditiva está conectada mucho a si misma, y está conectada con otra área de la corteza auditiva, la cual es el *Belt*, comparado a las otras regiones esta región tiene las siguientes características:

- Latencias de respuesta corta
- Funciones de sintonización de frecuencia espectral estrecha
- Sintonización de frecuencia de modulación relativamente rápida

La región *belt* recibe información tanto de MGm como de las neuronas de MGd , la misma esta subdivididas en dos subregiones, las cuales son distintas en cuanto a conectividad. La parte media esta conectada mayormente consigo misma y con la región *core* y tiene algunas conexiones con *parabelt*. La parte lateral de la región *belt* está mayormente Las neuronas de conectada consigo misma agregando algunas conexiones a las otras dos regiones.

Las neuronas de esta región tienen las siguientes características:

- Funciones de sintonización de frecuencia espectral más ancha.
- Entiende de buena manera los sonidos con frecuencias espetrales complejas.
- Exhiben latencias de respuesta más largas que *core*.

Finalmente la región *parabelt* igual qu la región mencionada anteriormente recibe información de las neuronas de las regiones del tálamo MGm Y MGd, y está conectada mayormente con si misma pero tiene algunas conexiones con *belt*. Esta sección de la corteza auditiva no se ha podido descubrir tanto de ella, pero se cree que esta es más responsiva para sonidos que son complejos, tanto espectralmente como en el tiempo, un ejemplo de esto serían las vocalizaciones.

Estos son los mecanismos que utiliza el sistema envíoso para poder identificar y clasificar el sonido, cabe anadir que la información de esta sección fue obtenida de [12].

6.4. Pulsos Binaurales

Por definición los pulsos binaurales son el entendimiento que le da el cerebro a dos señales de frecuencias distintas (obviamente en el espectro auditivo del ser humano). Estos son transmitidos por medio de auriculares para garantizar que se están escuchando dos frecuencias distintas en cada oído. La parte del cerebro encargada de procesar esta información es el núcleo olivar superior de cada hemisferio del cerebro correspondiente [2].

El concepto de pulso binaural es un tanto más complejo que una interpretación cerebral, para aclarar el concepto, se dará la siguiente explicación, según [13]: La señal recibida por cada oído es transmitida a la corteza auditiva. Al llegar al tronco encefálico, las señales llegan al núcleo olivar superior, el cual es la primer parte del cerebro que recibe la señal bilateralmente, ya que hasta el momento las señales estaban separadas. Ya en el núcleo olivar el pulso binaural se genera espontáneamente teniendo una frecuencia igual a la resta de las dos señales auditivas iniciales. Después se envía a la corteza auditiva primaria ya como un pulso binaural, reenviándose a áreas cerebrales relacionadas con el sentido del oído, haciendo que las señales EEG oscilen a la frecuencia de oscilación del pulso binaural generado.

Como se explicó anteriormente dependiendo de la actividad cerebral son las ondas cerebrales, y estas están directamente relacionadas con las etapas del sueño, ya que se ha observado que los pulsos binaurales logran afectar de manera más significativa la etapa del sueño más profundas tenemos que evaluar estas al momento de reproducir nuestros pulso.

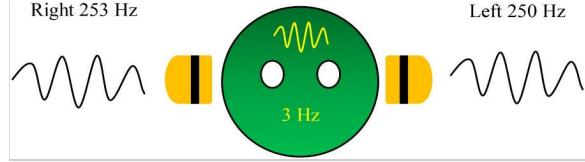


Figura 7: Diagrama pulso binaural [13]

Considerando que los pulsos binaurales al final son un sonido que se desea transmitir, se debe de saber cual es el rango de frecuencias en los cuales estos pulsos son percibidos por el ser humano, en [14] se indica que para frecuencias mayores a 1000 Hz, la mayoría de los sujetos de prueba, no detectaban el pulso binaural, o bien, se tenían que concentrar mucho para lograr detectarlo, además de esto se utilizaban diferencias de frecuencia muy bajas para poder distinguir los pulsos binaurales con esta frecuencia que en este marco de referencia se considera alta. También se concluyó que la diferencia máxima (siendo el pulso auditivamente perceptible) se encuentra en 400 Hz aproximadamente, logrando una diferencia aproximada de 35 Hz entre cada pulso.

Debido a que los pulsos binaurales necesitan tener frecuencias distintas en cada receptor de audio, en este caso los oídos, la manera más fácil de aplicarlos es utilizando un sonido surround de los audífonos, ya que estos pueden manejar frecuencias distintas en cada terminal, lo cual los hace ideales para esta situación.

Una ventaja de los pulsos binaurales es que son un método no invasivo que altera las señales EEG propias del cerebro haciéndolas resonar a la frecuencia del pulso binaural generado internamente. Además estudios anteriores que evalúan el comportamiento de las personas que son expuestas a los pulsos binaurales concluyen que hay un aumento en la fase electro-cortical, que puede causar los siguientes beneficios:

- Comunicación Neuronal
- Plasticidad Neuronal
- Memoria

Entre otros mencionados anteriormente, notamos que los pulsos binaurales si tienen un efecto tangible sobre los sujetos de prueba [15].

6.5. Formatos Digitales de Sonido

Debido a la variedad de sistemas operativos y las distintas maneras de almacenar información en estos días se llega a que hay muchos formatos digitales de audio. Cada uno con sus características particulares que lo hacen único, algunos cambian debido a que el sistema operativo puede reproducir los mismos de manera más fácil, o bien la forma de guardar el archivo es diferente, de la gran variedad de formatos digitales de sonido, en el presente trabajo escrito solo nos interesan 2, los cuales son:

- Archivos .ogg
- Archivos .wav

A continuación se dará una explicación mucho más detallada de cada uno de los formatos digitales de sonido, sus ventajas, desventajas y usos.

6.5.1. Archivos .ogg

Ogg o Vorbis dependiendo de como se conozca, [16] es el mismo acrónimo para un formato digital de audio creciente en la industria, este tipo de formato es mayormente utilizado para la distribución de música en línea. Sabiendo que mp3 sigue siendo el formato de audio más utilizado tenemos que otros tipos de formatos tal como el ogg han surgido últimamente dándole competencia a los otros formatos, una ventaja muy grande que tiene ogg es que no tiene licencia, lo cual hace que su uso sea gratuito tanto como para generación de audio. Un usuario particular no paga por utilizar archivos mp3, pero ya las plataformas mucho más grandes la licencia para la utilización de archivos de este formato puede llegar a tornarse un costo considerable, por lo que los formatos como ogg que no tienen licencia surgen como competidor por esta razón.

Otra característica interesante del formato Vorbis es que el decodificador de referencia está basado en matemática de punto flotante, aunque haya implementaciones que utilicen punto fijo. También el formato de audio ogg a diferencia de otros, tiene en su flujo de datos ciertas estructuras de datos las cuales permiten que se aumente el uso dinámico de memoria. Estas características mencionadas anteriormente, muchas veces hacen que este formato no sea tan utilizado ya que su uso no es tan común y también influye el poco tiempo que este formato tiene en el mercado a comparación de otros.

6.5.2. Archivos . wav

Este es un formato digital [17] de audio desarrollado especialmente para ser reproducido por varios sistemas operativos con relativa facilidad, este está basado en el formato Microsoft WAVE , una característica de este formato es que se tiene la información más básica para que el archivo se reproduzca de la manera más sencilla posible.

Es un formato de audio basado en fragmentos, el cual está basado en RIFF (por sus siglas en inglés), lo cual significa Formato de archivo de intercambio de recursos. Este formato de audio está compuesto por los siguientes fragmentos:

- Identificador de carácter
- La longitud del fragmento
- Y la información del fragmento

Seguidamente tiene un header RIFF el tipo de formato WAVE, seguido por otros fragmentos. En los siguientes fragmentos siempre se debe de tener el dato de extensión de audio

de transmisión el cual contiene la megadata correspondiente para el intercambio de datos entre transmisores. Cabe añadir que este tipo de formato de audio puede reproducir los siguientes tipos de audio:

- Mono
- Estéreo
- Estéreo conjunto
- Doble canal

CAPÍTULO 7

Implementación de Generador de Pulsos Binaurales en Raspberry Pi 3

En la tesis de José Pablo Muñoz [1] se logró generar pulsos binaurales satisfactoriamente desde un programa de Python, en el cual se variaban distintos parámetros para poder determinar la frecuencia que los pulsos binaurales generados iban a tener. Derivado de estos resultados satisfactorios, en este trabajo se migrará este programa a una Raspberry Pi y se verificará el funcionamiento del programa ya migrado a la Raspberry Pi 3.

Para una mayor explicación del presente capítulo, se creó un diagrama de flujo para la explicación del proceso de migración:

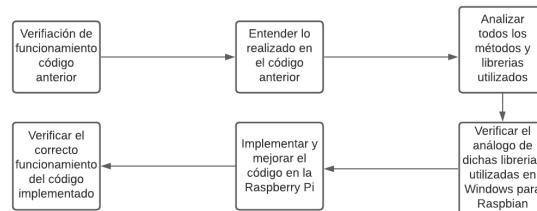


Figura 8: Diagrama de flujo explicativo de etapas de implementación de código a Raspberry

7.1. Familiarización con Python en Raspberry Pi 3

7.1.1. Raspberry Pi

La Raspberry Pi (RPi) es un dispositivo lanzado en el año 2012, el cual busca ser una computadora de bajo costo. Con solo añadirle periféricos de entrada como teclado, mouse, y periféricos de salida como el monitor, se puede usar como una computadora común. La

RPi utiliza sistemas operativos basados en Linux, por ejemplo, Raspbian.

Una de las ventajas de estos dispositivos es su precio debido a que es bastante bajo a comparación de computadoras portátiles laptops o de escritorio. En este caso se está utilizando la Raspberry Pi 3, la cuál tiene un precio aproximado de 45 dólares [18].

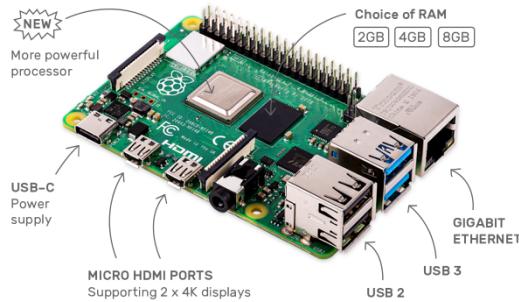


Figura 9: Fotografía Raspberry Pi [18]

Muchas veces se refieren a dispositivos como la RPi como *Single Board Computer* (SBC). Aunque algunas de estas SBC ya estuvieran disponibles en el mercado, no habían tenido el impacto que el RPi tuvo al ser lanzado, debido a que eran utilizadas para desarrollos industriales.

La RPi cuenta con los protocolos de comunicación y características como USB, UART, SPI, I²C, e interrupciones.

Debido al incremento de la popularidad de distintas áreas de la tecnología, tales como *Cyber Physical Systems* (CPS) e *Internet of Things* (IoT), el mercado para dispositivos como la RPi se ha ampliado de una manera exponencial [19].

7.1.2. Python

Python es un lenguaje de alto nivel, con una programación orientada a objetos, este lenguaje de programación es especialmente atractivo, debido a que se puede realizar un desarrollo rápido de aplicaciones. A comparación de otros lenguajes de programación, Python es simple tanto en sus sintaxis como en la forma de interpretarlo. Otra característica importante de Python es que soporta módulos y paquetes, haciendo así que sea bastante sencillo la reutilización de código [20].

La Raspberry Pi tiene incorporados varios módulos para poder correr programas en Python en la misma, los cuales son:

- Python (IDLE)
- Thonny Python IDE

En este caso se utilizó Thonny, ya que es un IDE en el cual podemos correr el programa de una manera más sencilla que en el IDLE propio de Python.

7.2. Migración de Programa

Algo muy importante al momento de migrar este tipo de programas a la Raspberry Pi, los cuales son, que este dispositivo, puede no tener todas las librerías que se necesitan para que el programa funcione eficientemente.

El generador de pulsos binaurales que se implementó en la Raspberry Pi se basó en el desarrollado en la fase previa [1]. Para el generador se tuvieron que utilizar las siguientes librerías de Python:

- numpy
- scipy

Las cuales son dos librerías que son utilizadas para realizar distintas operaciones dentro del código. Numpy es utilizada para las operaciones matemáticas y scipy es utilizada para la generación de un archivo wav.

Ya habiendo instalado las librerías correspondientes en la Raspberry Pi, habiendo corroborado esto en “Manage Packages” de Thonny, se dió la tarea de generar audios con este código migrado, obteniendo los siguientes resultados:

```
>>> binauralgenerator(200,44100,20,10,0)
('BinauralFrecuenciaCentral200.0FrecuenciaPulso20.0.wav', array([[ 0.           ,  0.           ],
   [ 0.02855605,  0.03141076],
   [ 0.05708881,  0.06279052],
   ...,
   [-0.19859047, -0.09410831],
   [-0.22649677, -0.06279052],
   [-0.25421834, -0.03141076]], dtype=float32))
```

Figura 10: Salida generador de Pulsos Binaurales

En esta figura podemos notar la cadena o *String* de datos, las cuales están compuestas por datos tipo flotantes (datos con decimales) los cuales representan los datos correspondientes al sonido generado.

En el caso anterior se evaluó la función llamada *binauralgenerator* con ciertos parámetros para observar si había una salida correspondiente, al correr el programa , obteniendo que se generaba un archivo como este:



Figura 11: Archivo .wav

Habiendo generado satisfactoriamente un archivo, se corroboró que el mismo se oyera de manera correcta, antes de hacer esto. Cabe mencionar que hay que forzar la salida de audio que sea por audífonos, porque de lo contrario la Raspberry puede estar transmitiendo por la salida HDMI. Tomando en cuenta lo anterior se comprobó que el audio estuviese sonando de manera correcta, esto de primero con el programa de VLC que viene incorporado al sistema operativo, obteniendo un resultado satisfactorio, se escuchaba un tono distinto en cada uno de los canales de los audífonos utilizados. Esto permitió verificar que la generación de archivos de audio es posible en la Raspberry Pi.

7.2.1. Problemática de Reproducción de Sonido entre Python y Raspberry Pi

Considerando que en la sección anterior solo se tomó en cuenta la generación de archivos de sonido utilizando Python, hubo un problema a la hora de reproducir los audios generados por el mismo programa debido a una limitante de la librería utilizada. Esta librería es:

- pygame

Esta libreria no permite reproducir archivo wav de 32 bits, sino que solamente de archivos de la misma denominación de 16 bits. Se corroboró lo anteriormente mencionado utilizando el siguiente código:

```
def playbinaural(filename):
    pygame.init()
    sonido = pygame.mixer.Sound(filename)
    sonido.play()
```

Figura 12: Código para reproducir archivo de audio

El siguiente código utiliza la librería de pygame y la función mixer de la misma para poder reproducir archivos de audio. Haciendo pruebas, se trató de utilizar el archivo generado por el programa de *binaural generator* pero no se logró obtener una salida de audio, obteniendo el siguiente error:

```
Traceback (most recent call last):
  File "<pyshell>", line 1, in <module>
    File "/home/pi/Desktop/Tesis_Luis_Guerrero/ArchivosPrueba/GeneradorReproductordePulsosBinaurales.py", line 97, in playbinaural
      sonido = pygame.mixer.Sound(filename)
pygame.error: Unable to open file 'Binaural0.wav'
```

Figura 13: Error al utilizar archivo .wav

Seguidamente se utilizó un audio de prueba obtenido de internet, y este si pudo ser reproducido de manera correcta.

Un problema en general de utilizar archivos wav en Raspbian, sistema operativo de la Raspberry Pi, es que no son el archivo que mejor maneja el sistema operativo, en cambio este maneja de mejor manera, los archivos multimedia OGG. Tomando en cuenta esto, se

hizo una conversión desde una página web, y se hizo la prueba con los archivos convertidos a OGG, obteniendo resultados satisfactorios. La solución del problema es utilizar este tipo de archivos para que sean reproducidos con mayor facilidad en Python.

7.2.2. Resolución Problemas de Reproducción de Sonido

Como se mencionó anteriormente, no se encontró un método útil para poder reproducir pulsos binaurales, este no es un problema tanto del usuario final, como del desarrollador, ya que para el usuario final se le debe de dar un rango de frecuencias más pequeño. Debido a que se está estudiando el efecto de los pulsos en las personas, es estudiará la mayoría del rango audible, por lo cual no es eficiente tener audios pre-grabados. Como se mencionó la librería de pygame no reproduce archivos wav, entonces no se estaba pudiendo reproducir los sonidos que eran deseados.

Se investigaron varias posibles soluciones. Una de las cuales fue la utilización remota del programa integrado en la Raspberry para reproducir audio llamado *VLC media player* el cual es capaz de convertir a distintos formatos de audio, como cualquier otro programa de audio. Para la aplicación de este solución se necesitaba operar la aplicación externa desde Python, lo cual resultó muy tedioso y complicado, dpor lo cual se evalúo otra alternativa.

La solución utilizando *VLC Media Player* fue planteada ya que luego de exhaustiva investigación, no se encontraba una librería específica de python, la cual pudiese convertir archivos a formato OGG, que como se mencionó anteriormente, son el tipo de archivos que la librería de reproducción soportaba, y debido a que no se encontraba una manera de guardar los archivos en un formato que no fuese wav, no se tenía ninguna otra solución. Luego de haber fallado implementando la solución que empleaba la utilización de *VLC media player* se investigó aún más y finalmente se encontró la librería pydub, que permite la conversión entre formatos de audio.

El siguiente diagrama presenta el proceso que se llevó a cabo para la implementación del conversor de formato .wav a formato OGG:

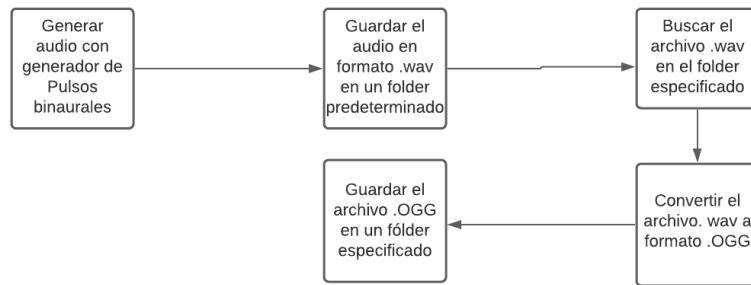


Figura 14: Prueba de reproducción con VLC Media Player

El primer paso fue generar los archivos con formato OGG, para luego utilizando ahora sí *VLC media player* para comprobar, que los archivos fuesen realmente convertidos y que se pudieran reproducir por una herramienta externa que no fuera Python:

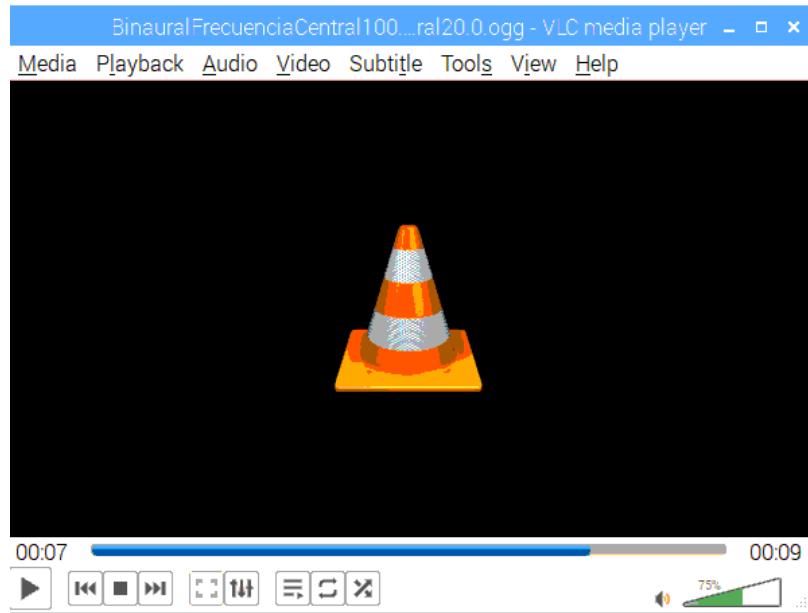


Figura 15: Prueba de reproducción con VLC Media Player

Habiendo obtenido un resultado satisfactorio en la prueba de sonido con un reproductor externo, ya se pudieron realizar pruebas pertinentes para finalmente verificar el funcionamiento de la librería `pygame` para reproducir los archivos generados, y efectivamente se verificó que los archivos OGG generados, podían ser reproducidos por dicha librería.

Es muy importante mencionar el procedimiento que se llevó a cabo fue el de una conversión entre formatos de audio. No se está generando los archivos como OGG, desde la etapa del generador de pulsos binaurales. Se está generando un archivo wav, el cual puede ser generado por el algoritmo basado en la tesis [1], y al momento que este archivo es generado, esté se ubica en un folder en específico. Este archivo queda guardado con ciertos parámetros, tanto la frecuencia central de los pulsos como la frecuencia de pulso binaural. Cuando el archivo .wav es guardado, su nombre incluye los parámetros anteriormente mencionados. Finalmente para la conversión de formato .wav a OGG el comando utilizado propio de pydub, busca el archivo con las características que se acaban de guardar en el folder especificado anteriormente, y luego lo convierte, utilizando un método propio de la librería, obteniendo el siguiente resultado:



Figura 16: Archivo OGG generado

El formato de los nombres de los archivos se escogió para facilitar la identificación de las

características de los audios. Esto es de mucha importancia para otros módulos del sistema desarrollado.

7.3. Evaluación Funcionamiento de Programa

Luego de haber logrado la generación del pulso binaural deseado, el cual fue implementado en la Raspberry Pi, se procedió a verificar el funcionamiento, esto se logró realizando un análisis en el espectro de frecuencias en Matlab. Esto debido a que los análisis con respecto al tiempo no son útiles en este caso ya que los mismos solo nos mostrarían como es la amplitud del pulso binaural (que es representada como una onda sonora).

El primer paso de la verificación fue generar un pulso binaural con el programa ya migrado. Como primera prueba, se generó un pulso con las siguientes características:

- Frecuencia de los pulsos binaurales generados: 20 Hz
- Duración del pulso binaural: 10s
- Frecuencia central de los pulsos binaurales: 200 Hz

Se realizó un código simple en Matlab, en el cual de primero se verifica que el sonido tenga dos canales, el izquierdo y el derecho, lo cual es muy importante para este módulo, ya que el funcionamiento del mismo depende de la diferencia de frecuencia que haya entre ambos canales, para que el cerebro interprete estos sonidos como un pulso binaural. El proceso de “interpretación” que tiene el programa para detectar al pulso binaural es que resta el canal que tiene una frecuencia más alta contra el que tiene la frecuencia más baja, obteniendo así el siguiente resultado:

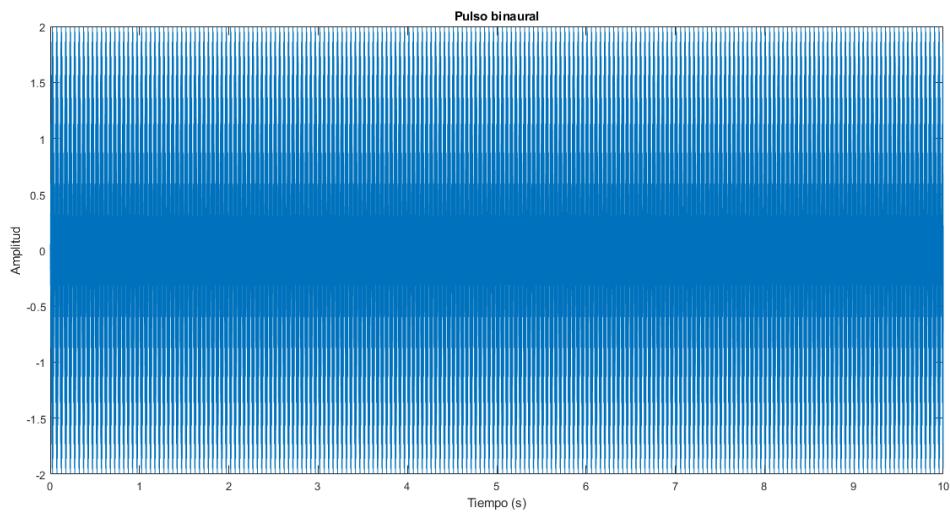


Figura 17: Pulso Binaural obtenido

Como se aprecia en la Figura 17, el programa está generando de manera correcta el tiempo del pulso, el cual se determinó que fuese de 10 s. .

Para apreciar de mejor manera la imagen, podemos ver que la onda sonora que el cerebro interpreta como pulso binaural es de la siguiente manera:

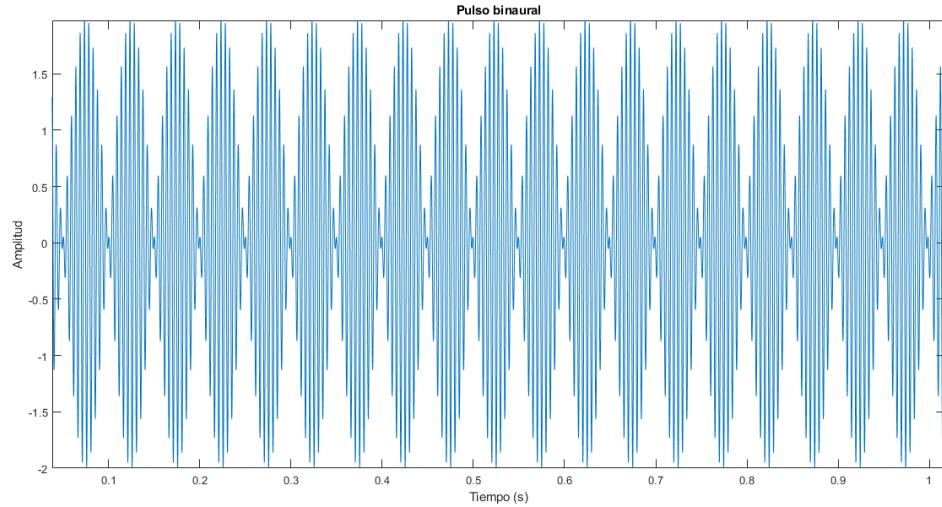


Figura 18: Pulso Binaural obtenido (1 s)

Aunque se puede apreciar de cierta manera el sonido y como se comporta con respecto al tiempo, no se puede tomar conclusiones con respecto al buen funcionamiento del algoritmo. Debido a esto debemos de realizar un análisis en el espectro de frecuencias, el cual nos dé como resultado la frecuencia central de nuestro pulso binaural, y la diferencia de frecuencia entre los canales. Esto se realizó utilizando la Fast Fourier Transform (FFT) en Matlab, haciendo algunos ajustes que se lograrán apreciar a continuación.

Hay un método en Matlab, que es utilizado especialmente en la FFT), para poder obtener la frecuencia en Hz para nuestro cálculo en el espectro de frecuencias, que es llamado *Single-sided amplitude spectrum* , el cual mediante el siguiente procedimiento, nos ayuda a llegar a una escala en Hz deseada.

Ya habiendo desarrollado el método antes mencionado en Matlab, se realizó la medición tanto de ambos canales por separado, tanto como de la resta de ambos, obteniendo los siguientes resultados:

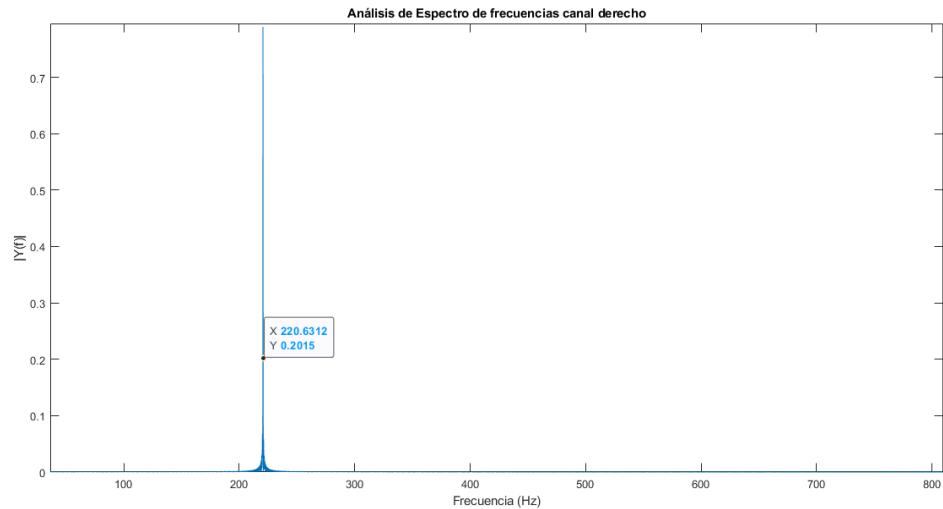


Figura 19: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Derecho

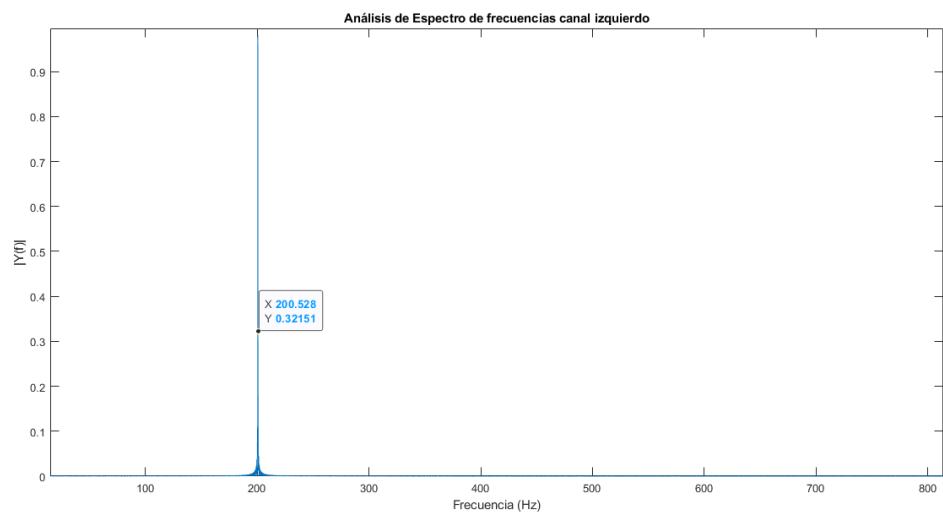


Figura 20: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Izquierdo

En la figura del canal derecho se nota que el espectro de frecuencias para el canal derecho se encuentra en los 220 Hz.

Analizando la gráfica del canal izquierdo, se aprecia que el espectro de frecuencia del canal, es de 200 Hz, considerando esto se puede corroborar el buen funcionamiento del programa tanto para generar tanto la frecuencia central del audio, que en este caso son 200 Hz, y la diferencia entre ambos canales, que en este caso debería ser 20 Hz, que de igual manera se cumple.

Para finalizar con la verificación se analiza también el espectro de frecuencias del pulso binaural generado, como se muestra en la Figura 24, en este caso se verifica el buen funcionamiento de los dos canales en conjunto, obteniendo los mismos valores de frecuencia que

anteriormente se encontraron de manera separada.

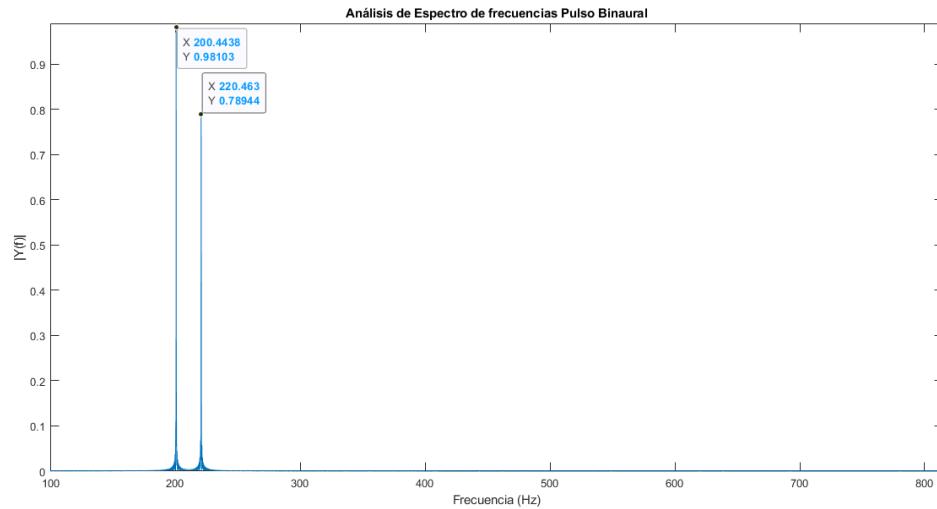


Figura 21: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Pulso Binaural

Es importante recalcar que se realizaron las pruebas correspondientes con distintos tonos de frecuencias es decir, con distintas frecuencias de pulso binaural y distintas frecuencias de pulso central para corroborar que el programa implementado, funcione en varias bandas de frecuencia (siempre en el rango audible).

Con todas estas verificaciones podemos concluir que el programa está generando los archivos wav de manera correcta, con esto se termina la verificación del funcionamiento correcto del generador de pulsos binaurales en la Raspberry Pi.

CAPÍTULO 8

Interfaz Gráfica

Uno de los objetivos más importantes de este trabajo, es el desarrollo de una interfaz gráfica fácil de utilizar para el usuario, ya que los que utilizarían esta aplicación no son los desarrolladores. Debido a esto se utilizaron ciertas herramientas que ayudaron al desarrollo de la interfaz gráfica, de los cuales se dará más detalles a continuación.

En cuanto a la interfaz gráfica obtenida, se puede verificar tanto la funcionalidad de la misma, tomando en cuenta las limitaciones de las herramientas utilizadas, para desarrollar la misma.

8.1. Herramientas utilizadas para la Interfaz Gráfica

8.1.1. Pantalla Táctil 7"

Algo muy importante que se debió tomar en cuenta fue, fue la dificultad de utilizar la Raspberry Pi con un monitor para la utilización del programa debido a que esto sería lo mismo que haberlo implementado en una computadora portátil. Lo cual se solucionó utilizando una pantalla LCD que es compatible con la Raspberry Pi. Esta pantalla es fabricada por la misma empresa que diseña la Raspberry Pi.

La pantalla LCD, es un dispositivo que es similar al funcionamiento un monitor conectado por HDMI, a la Raspberry Pi. Esta pantalla se puede controlar con los periféricos de entrada convencionales, siendo estos el teclado y el mouse. Y debido a que es una pantalla táctil, se puede interactuar con la Raspberry Pi por medio de tacto con la pantalla. De la misma manera se utiliza un case donde quedan descubiertos todos los puertos de la Raspberry Pi, para obtener un *setup* más estético.

Conexiones Pantalla Táctil 7"

Las conexiones de la pantallas son bastante sencillas, estas solamente son conexiones de 4 *jumpers* de la pantalla LED a la Raspberry Pi, y un *Ribbon Cable* o cable de múltiples hilos que va a la entrada de este tipo en la raspberry Pi, como se muestra en Figura 22 y Figura 23.



Figura 22: Conexiones de Raspberry Pi a Pantalla Táctil de 7"

Cabe mencionar que se utilizó un *case* para que la pantalla tuviera un aspecto más estético.

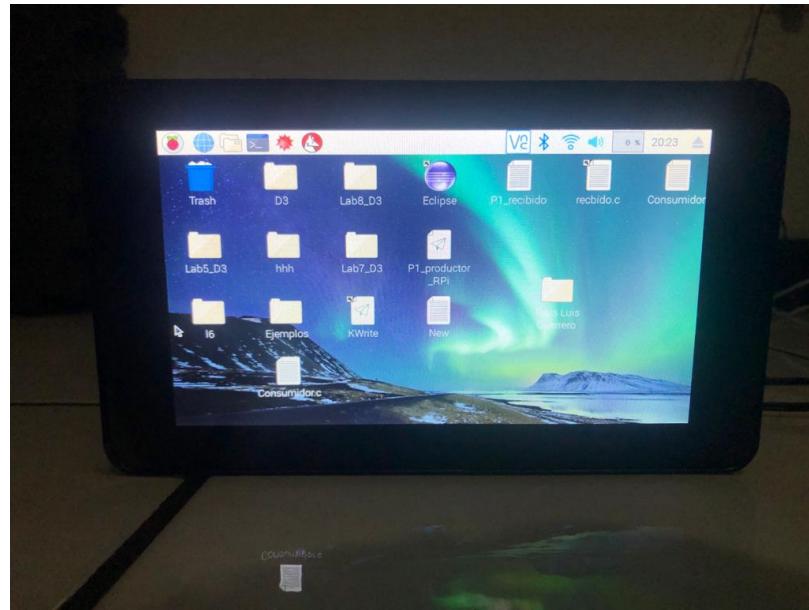


Figura 23: Vista de Frente Sistema Pantalla Táctil-Raspberry

8.2. Tkinter

Como se mencionó anteriormente, la interfaz gráfica es una parte importante del sistema desarrollado. Luego de investigar sobre distintos paquetes que son compatibles para realizar interfaces gráficas, se llegó a que se utilizaría Tkinter que es un paquete incluido dentro de Python (en este caso se tuvo que instalar las librerías correspondientes en la Raspberry Pi). Es el generador de interfaces gráficas por defecto, y por esa misma razón se eligió la utilización de esta librería, debido a que hay mucha más documentación de esta librería que de otras, tales como Kivy (otra librería de para generación de interfaz gráfica compatible con Python). Además, la utilización de esta librería es simple y versátil, lo que la hace la indicada para este módulo.

8.3. Desarrollo de Interfaz Gráfica

Considerando todas las herramientas mencionadas anteriormente, se realizó el diseño de la interfaz gráfica. Esta debía ofrecer al usuario las funcionalidades de :

- Generación de pulsos binaurales
- Reproducción de pulsos binaurales

El siguiente paso a seguir era la implementación de la interfaz gráfica con todos los componentes mencionados anteriormente, y algunas características que hicieran a la misma, amigable con el usuario.

8.3.1. Creación de etiquetas y botones

Algo muy interesante que surgió al momento de realizar la interfaz gráfica es que Tkinter no tiene incorporado en sí una manera muy eficiente de estilizar los distintos componentes que se pueden generar, tales como:

- Etiquetas
- Botones
- etc

Debido a esto se tienen que exportar imágenes las cuales cumplirán la función de estilizar la interfaz gráfica, algo raro de Tkinter es que no detecta si una imagen tiene transparencia, lo que significa esto es que si una imagen tiene algún lugar el que sea transparente, cuando se añade a la ventana, no lo reconoce, así que al momento de exportar imágenes, estas deben de tener el color de fondo que tenga predeterminado la ventana. Se iba a utilizar un fondo distinto (una foto en específico), pero a esta problemática, se optó por un diseño más simple en el cual el color de fondo fuera un color sólido y no una imagen.

8.3.2. Versión 1 Interfaz Gráfica

Como se mencionó anteriormente se utilizó la librería de Tkinter propia de Python para el desarrollo de la interfaz gráfica. La idea inicial era realizar las distintas páginas de la aplicación, y luego ejecutar las demás dependiendo de la página que se quisiera utilizar. Esta manera de realizar la aplicación no es muy inteligente, ya que uno de los objetivos nos restringe a que la aplicación pueda realizar múltiples subprocessos de forma paralela, entonces, no se estaría cumpliendo con este requerimiento.

En el presente trabajo se tomó la mala decisión de realizarlo de la manera anteriormente mencionada. La implementación se tornó un tanto complicada, al punto en el que se estaban corriendo programas de Python desde otras programas, como ejecutables. Esto no solamente no cumple con las restricciones de los objetivos sino que no es una manera correcta de programar en Python, debido a que si se va a utilizar un programa externo al actual, se deben de importar sus clases.

Debido a esto se tuvo que buscar otra solución a esta problemática, ya que si se estaba desarrollando cada ventana de la aplicación por separado, no se podían integrar en una sola aplicación. Debido a esto se encontró la solución de los *frames* en Tkinter, la ventaja de los *frames* es que todas las clases asociadas se corren paralelamente. Pero hay un método el cual logra que alguna estas sea la que se despliegue, siendo este, el método *showframes*, el cual dependiendo de la entrada, despliega la ventana correspondiente, con eso, se logró algo muy importante que fue la implementación de todas las ventanas, el prototipo es el siguiente:

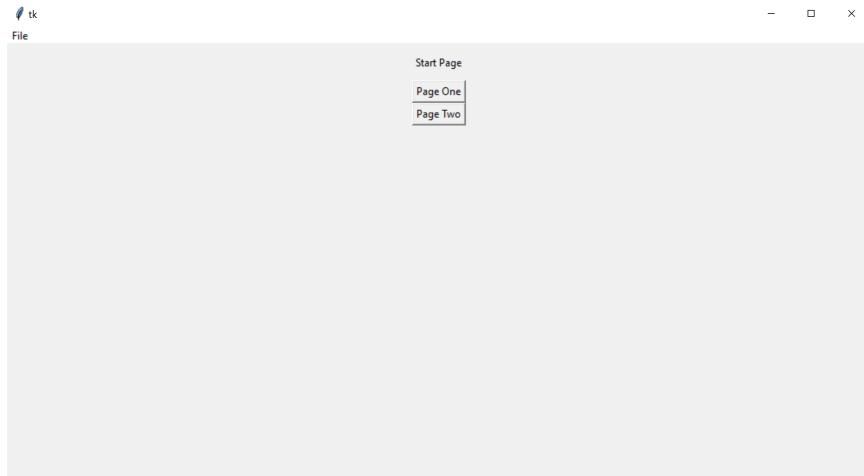


Figura 24: Ventana principal prototipo

Como se logra apreciar, hay una página principal que se despliega al momento de correr la aplicación, y de esta forma se puede recorrer las múltiples ventanas de la aplicación, como por ejemplo:

Aunque las Figura 24 y Figura 25 son muy parecidas, es importante mencionar que lo que se está demostrando es el método de cambio de *frame*, que es logrando con el método *showframes* mencionado antes.

Con estos métodos descritos anteriormente ya se puede implementar una aplicación en si,

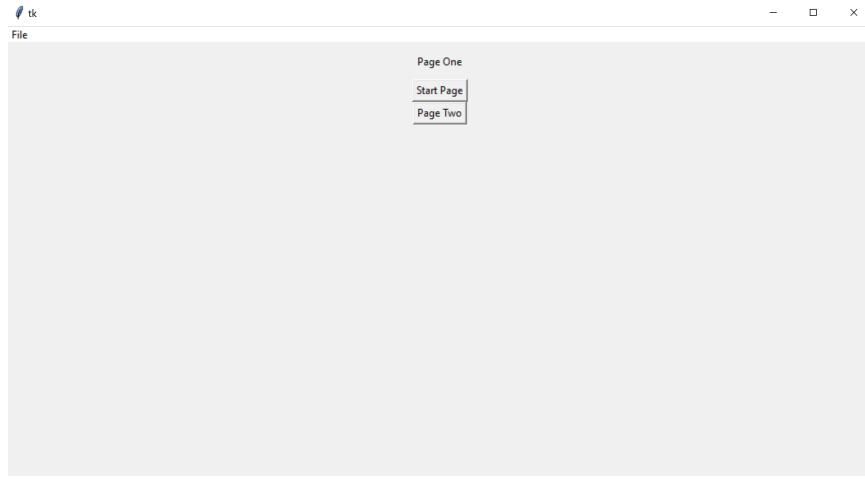


Figura 25: Ventana secundaria prototipo

porque lo que se intentó realizar al principio fue la implementación de varias aplicaciones y la conexión entre ellas. Cabe añadir que todos las ventanas son del mismo tamaño utilizando este método, se puede estilizar todo lo demás, pero esta variable (el tamaño de la ventana) permanece constante para todas las ventanas.

8.3.3. Versión 2 Interfaz Gráfica

Todas las ventanas de la aplicación tienen algunas características generales, estas son:

- Ajuste de Brillo
- Botón de apagado
- Botón de regreso



Figura 26: Botones principales prototipo

Ajuste de Brillo

Debido a que el dispositivo está pensado para que sea utilizado al momento de dormir (en la noche) se tiene que tener una capacidad de ajustar el brillo de la pantalla para que no sea molesto al momento de utilizarlo, este botón cumple esta función.

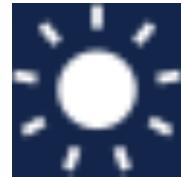


Figura 27: Botones principales prototipo

Botón de apagado

En todo momento es posible terminar la aplicación desde cualquiera de las ventanas, este botón se encuentra en la esquina superior derecha a un lado de l ajuste de brillo.



Figura 28: Botones principales prototipo

Botón de regreso

Excluyendo la página de inicio, todas las páginas tienen la opción de regresar a la página anterior, este botón se encuentra en la esquina inferior izquierda.

Estas son las funcionalidades generales de la interfaz gráfica, que logra facilidad de navegación en la aplicación. Cabe añadir que no se agregó un botón de sonido, en el cual se pudiese ajustar la intensidad del mismo, ya que eso se puede modificar en las opciones de la Raspberry.



Figura 29: Botones principales prototipo

8.3.4. Ajuste de la interfaz a la Pantalla LCD

Algo importante que hay que notar, es que toda la interfaz gráfica se estaba programando en un monitor convencional, pero el usuario debería de poder utilizar la pantalla táctil mencionada anteriormente para poder navegar por la aplicación, pero esta pantalla táctil tiene dimensiones mucho menores a las de un monitor convencional, por lo cual se tuvo que hacer el cambio, no solo del tamaño de la ventana que se despliega como de las distintas etiquetas y botones que ya se habían posicionado anteriormente a encontrar este error.

8.3.5. Página de Inicio

La Página de Inicio, es la primera ventana que se muestra al momento de ingresar la aplicación. la cual se puede observar en la Figura 30.

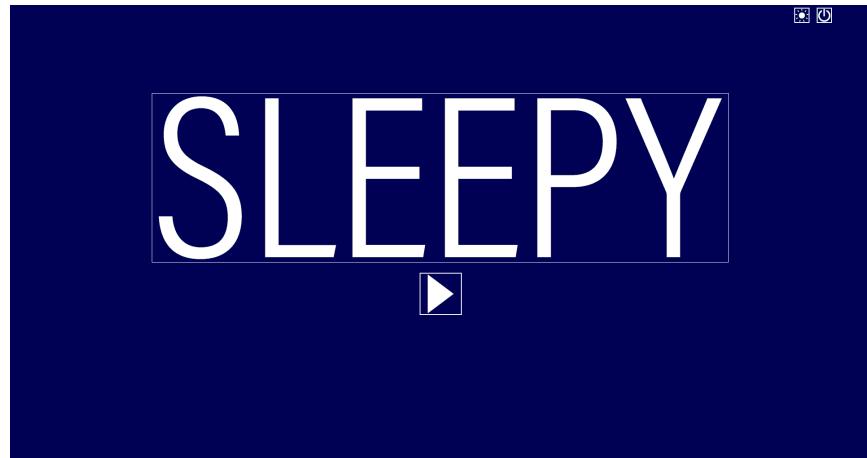


Figura 30: Ventana principal de Interfaz Gráfica

Esta página tiene algunas diferencias con las demás, una de las cuales es que no hay botón de regreso, como se mencionó anteriormente. Además, el botón de *play* es el botón que hace que otra ventana se despliegue, siendo este el de Submenu.

En el primer paso, causado porque Tkinter no tiene una gran capacidad de modificación de botones, se guarda una variable con una imagen específica, en este caso el botón de *play*

Seguidamente se asigna el tipo de variable *button*, para tener la posibilidad de generar una acción cuando este sea presionado, también está variable de botón incluye la variable de imagen anteriormente mencionada para tener la forma y color de la imagen anteriormente especificada. Y en la misma instancia del botón se asigna que ocurra una acción cuando sea presionado, la cual es el método *showFrames*.

Finalmente se hace asigna una posición al botón. Esta es la manera de utilizar botones, se pueden utilizar otras funciones, en este caso solo se menciona a *showFrames* porque es el caso, pero se puede utilizar otra función o método al momento de llamar a la misma., por ejemplo si se desea utilizar la función apagar, en vez de colocar *showFrames()* se escribe *apagar()* y sucederá lo que la función este programada para hacer.

Para las imágenes que no son botones, el procedimiento es el mismo, solo que en ese caso se utiliza el tipo de variable propio de Tkinter *label* en lugar de *button*, y debido a que no tienen una acción al ser presionadas, solo deben de ser ubicadas en la ventana.

Debido a la utilización de Tkinter, para poder desplegar las imágenes correctamente, las variables correspondientes a las mismas, deben de ser globales.

8.3.6. Sub Menu

La ventana de Sub Menu tiene la funcionalidad, de poder navegar a todas las ventanas, es un paso obligado para poder generar y reproducir pulsos binaurales, tiene el mismo método anteriormente mencionada para mostrar ventanas. La ventana de SubMenu se ve de la siguiente manera:



Figura 31: Sub Menu de Interfaz Gráfica

Los botones son explícitos en este caso, en el cual si se quiere generar un audio de presiona el botón de GENERAR AUDIO, de la misma manera para REPRODUCIR AUDIO. Tiene las funcionalidades generales de ventana mencionadas en secciones anteriores, y los botones son instanciados de la misma manera.

8.3.7. Generar Audio

Debido a que el fin de esta tesis es poder reproducir cualquier pulso binaural ,para poder determinar posteriormente el rango de frecuencias que induce positivamente al sueño. Se debe tener la habilidad, de generar cualquier pulso binaural, tanto de frecuencia central, como frecuencia de pulso binaural, para poder recopilar estos datos.Todo lo antes mencionado en este párrafo se implementó en la siguiente ventana:

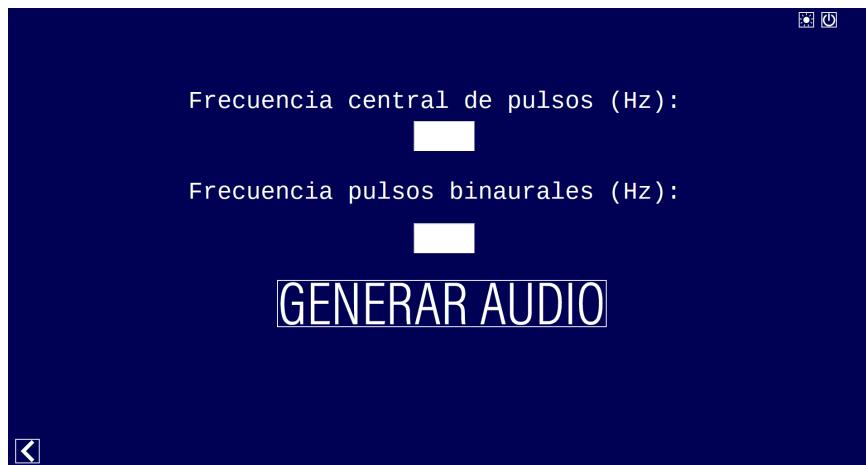


Figura 32: Generar Audio de Interfaz Gráfica

La primera diferencia que tiene esta página con respecto a las demás son las entradas de texto, que definen:

- Frecuencia central de los pulsos
- Frecuencia de pulso binaural

Se utilizó como base el programa generado por José Pablo Muñoz en la tesis que precede al presente trabajo, con la diferencia que se utilizaron variables de las entradas de texto correspondientes. Seguidamente se guardan los archivos wav en una carpeta, y el mismo programa automáticamente los convierte a archivos OGG, para su fácil reproducción en Python. Los archivos son guardados en carpetas específicas, las cuales pueden ser accesadas desde otras ventanas del programa.

Cabe mencionar que para esta generación de sonidos, el tiempo de todos los sonidos generados es de segundos, el motivo de esto es debido a que entre más tiempo de sonido sea requerido, ocuparemos mucha memoria, por ejemplo no podríamos almacenar una gran variedad de sonidos de distintas duraciones, aproximando el tiempo de sueño a unas 7 horas, por lo cual se ideó que todos los sonidos tuviesen la misma duración, con la diferencia, que este sonido se repetiría n cantidad de veces dependiendo del tiempo de reproducción. Esto resuelve tanto problema de memoria, la cual es limitada (aunque es muy grande no es eficiente tener muchos archivos de 7 horas, cuando uno de 10 segundos puede realizar la misma función), y también resuelve el problema de tiempo de generación, el cual sería absurdo si fuese un archivo de 7 horas, debido a que el algoritmo logra generar el sonido en aproximadamente el mismo tiempo que este dura.

Al momento que el archivo de audio se genera, se le da un nombre en clave, el cual describe las características del pulso, ya que luego de ser guardados como archivo OGG, son localizados en una carpeta en específico en la cual debe de ser posible identificar las características de los audios para elegir el correspondiente, lo cual se realizó en Resolución Problemas de Reproducción de Sonido del Capítulo 7 de esta tesis.

8.3.8. Reproducción de Audio

La ventana de Reproducción de Audio tiene muchas funcionalidades que se tuvieron que implementar para que funcionara de la mejor manera, posible. Esta ventana a grandes rasgos cumple la función de reproducir audio, elegir audio, elegir tiempo de reproducción, la siguiente imagen presenta la ventana:



Figura 33: Ventana de Generación de Audio Interfaz Gráfica

La primera distinción de esta página, es la entrada de tiempo de reproducción, en la cual la primera versión de la Interfaz gráfica, queda libre para que el desarrollador pudiese encontrar los pulsos binaurales que propiciaran el sueño, esta parte se logra de la misma manera que las entradas de texto de la ventana de generación de audios. Al momento de ya haber definido el tiempo de reproducción lo que prosigue es presionar el botón que dice: “Tiempo de reproducción”, y de esta manera cargar un valor que será utilizado posteriormente para determinar cuantas veces se reproduce el sonido.

Seguidamente, se tiene el botón: “Tiempo de Reproducción”, el cual habiendo ingresado, el tiempo de reproducción carga un valor a una variable en específico, que hará que el audio se reproduzca una cantidad de tiempo determinado. Inicialmente este procedimiento se había pensado implementarlo con un ciclo *while*, el cual repitiese el método la cantidad de veces necesarias para llegar al tiempo de reproducción, pero ya pygame (la librería de sonidos que se utilizó para la reproducción de sonidos), trae implementado en su función de reproducción que repite el sonido cierto numero de veces. Esto es una opción que tiene la librería cuando se utiliza la función *play* por defecto tiene la opción que el numero n de veces que se repita es igual a 1, entonces el sonido se repetiría una vez, en este caso 10 segundos que dura el audio, y de esta manera se logró esto. Cabe mencionar que algo útil, es poder generar un sonido por tiempo indefinido, ingresando en la función el valor de -1.

Otro botón que está presente en la ventana que se está analizando, es el botón de parar, el cual es bastante simple, lo que hace es que cuando es presionado, detiene al sonido que se está reproduciendo, y lo regresa al tiempo 0, por ejemplo si se tiene un audio que dura 10 segundos, el mismo se está reproduciendo y en el segundo 5 se presiona parar, al momento de volver a reproducir el sonido, este se reproducirá por 10 segundos, ya que no queda guardado en que momento fue detenido el sonido.

Ahora bien con el botón de pausa es un poco más complicado, debido a que se debe de considerar que si se presiona el botón de pausa se debe de guardar en que momento del audio se encuentra el usuario, en concreto esto no se hace ya que hay funciones específicas de pygame que ya implementan esto, que son *pause* y *unpause*, pero debido a que sería un poco innecesario tener solo un botón para play y otro para pausar, lo que se realizó fue que el programa tiene un estado, el cual al momento cuando se presiona *play*, este asigna un valor a una variable, que indica que el botón de *play* ya no inicia en 0, sino que es un botón que reanuda el audio.

Finalmente se tiene el botón de elegir audio, el cual es el encargado de desplegar lo siguiente:

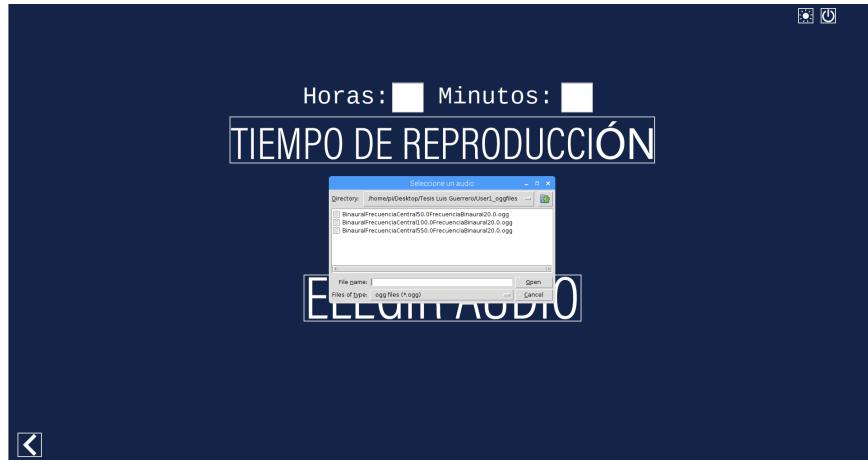


Figura 34: Seleccionar Audio de Interfaz Gráfica

Cuando se despliega esta ventana, se redirecciona a un folder predeterminado donde se encuentran todos los archivos de audio que se han generado, estos archivos como se mencionó anteriormente, tienen la información correspondiente (Frecuencia central y frecuencia de pulso binaural) para que el usuario los pueda elegir correctamente. Hay que mencionar que por obvias razones sino se ha generado ningún archivo desde el generador de sonidos, no se podrá seleccionar ningún archivo.

8.3.9. Implementación multi-hilos

Uno de los objetivos del presente trabajo era verificar si la programación multi-hilos podía ofrecer alguna ventaja en la implementación de la aplicación. Por ejemplo, mientras se está ejecutando un subprocesso en una ventana, se tiene que poder realizar otros subprocessos, y no interrumpir los mismos, esto se logra utilizando multi-hilos entre otros métodos.

Inicialmente se planteó como solución del problema la programación en mult-hililos, pero debido a las condiciones de programación que sucedieron, se encontró una solución diferente pero eficaz, que lograse ejecutar varios subprocessos al mismo tiempo, siendo esto la utilización de clases y métodos. Siendo Python un lenguaje de programación orientado a objetos, y cuales son las ventajas más grandes de la programación orientada a objetos, en este caso se sabe que es la definición de clases y la manera en la que estas clases pueden

heredar sus atributos entre ellas.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, el problema se solucionó programando en Python, con programación orientada a objetos, en la cual se programaron todas las clases en un mismo script. Recordando los métodos mencionados anteriormente, específicamente el método *showFrame* indica cual de las ventanas será desplegada, pero si una de las ventanas no está desplegada, puede seguir realizando proceso, debido a que todo se corre simultáneamente. Por ejemplo, si se está reproduciendo un audio, y se cambia de ventana, lo que sucede realmente es que se está desplegando visiblemente la ventana nueva, pero el proceso el cual está realizando la ventana anterior que en este caso es de reproducción sigue ejecutándose en paralelo, debido a esto no es necesaria la implementación de multihilos.

Es importante mencionar que no se establece que la forma de programar por clases es un sustituto para la programación multi-hilos, sino que para la aplicación que se desarrolló, no es necesaria la implementación multi-hilos, debido a que la función de la misma se ve cubierta con el método de programación orientada a objetos, en este proyecto en específico no fue necesaria la implementación del modelo multi-hilos.

CAPÍTULO 9

Efectos de los pulsos Binaurales en la Calidad del Sueño

Luego de haber logrado una implementación efectiva de la interfaz gráfica, considerando que esta es una parte muy importante de la presente tesis, se tiene que la misma solo es una herramienta. Para poder empezar a observar patrones de comportamiento que las personas tienen al momento de ser expuestas a pulsos binaurales, en este caso, se tienen que hacer pruebas preliminares para poder detectar a grandes rasgos, que tipo de frecuencias funcionan mejor para dormir más plácidamente. También se deben de descartar los rangos de frecuencia con los cuales sea imposible descartar.

Cabe destacar que por la pandemia causada por el COVID-19 las pruebas se realizaron a un grupo pequeño de personas, este siendo conformado solamente por el escritor de esta tesis y su familia.

9.1. Frecuencias centrales y diferencia de tonos no idóneos

La revisión de los efectos de los pulsos binaurales en la calidad del sueño es clave debido a que, esta será una restricción que se le tendrá que dar al usuario, haciendo pruebas preliminares, las frecuencias más altas son insopportables, debido a esto se presume que los mejores resultados se darán a frecuencias más bajas, a continuación se detallará de mejor manera como se llevo acabo la experimentación.

El primer análisis se hizo variando las frecuencias centrales de los pulsos. Como se mencionó anteriormente los humanos tenemos un espectro de aproximadamente de 16 Hz a 20,000 Hz en audición. Lo que se realizó fue una prueba utilizando la misma frecuencia de pulso binaural de 20 Hz, y también el mismo tiempo de muestreo. Se hicieron experimentos con otras diferencias de frecuencia entre canales y el resultado fue el mismo, se varió la frecuencia de pulso binaural de 1 Hz a 100 Hz y se obtuvo el mismo resultado. Se empezó en

una frecuencia central de 10,000 Hz, la cual aunque es audible, no produce ningún tipo de relajación ni de confort, se fue bajando la frecuencia gradualmente, por ejemplo se evaluaron frecuencias de 2,000 Hz, 1000 Hz, 500 Hz, que aunque no es un sonido muy agradable para el examinador, no es insopportable como los sonidos mencionados anteriormente, seguidamente se fue bajando la frecuencia y el examinador concluyó que el rango de 16 Hz a 250 Hz es el adecuado para poder llegar a facilitar el sueño. Esto porque las bandas de frecuencia antes mencionada, causaron mayor facilidad para dormir en comparación a bandas de frecuencia con valores más altos.

Cabe mencionar que es muy importante la intensidad del sonido, ya que a frecuencias más altas, el sonido se puede tornar insopportable, también hay que considerar que cuando el sonido no es tan intenso se puede dejar de percibir la frecuencia del pulso binaural.

El experimento siguiente a realizar es calcular las frecuencias más agradables de pulso binaural, esto se llevo a cabo analizando una frecuencia central del sonido que fuese agradable, en este caso 150 Hz, e ir variando la frecuencia de pulso binaural, desde un punto bastante agradable, 5 Hz, hasta que llegamos a los 100 Hz, como fue el caso anterior , con frecuencias de pulso binaural más bajas se obtuvo un resultado más placentero y que pudiese llevar a un sueño más plácido. Se fue aumentando la frecuencia de pulso binaural, y se llegó a la conclusión que este valor hasta 1000 Hz puede llegar a no molestar tanto, como se estableció en el párrafo anterior se tiene la hipótesis que tanto frecuencias centrales más bajas (o graves) como frecuencias de pulso binaural más pequeñas pudiesen contribuir más al sueño.

Considerando esta experimentación previa que se llevó a cabo, se tienen que:

- La frecuencia central debe de ser de 16 - 1000 Hz para no ser tan molesta
- La frecuencia de pulso binaural, debe de ser de 1 a 1000 Hz
- Hay que tomar en consideración la intensidad del sonido a mayores frecuencias

9.2. Pruebas Frecuencia Central de Pulses Binaurales

La sección anterior proporcionó datos para poder reducir de todo el espectro auditivo, cuales frecuencias tanto centrales como de pulso binaural, son más idóneas para poder dormir con ellas ya que esto es el fin del presente trabajo. Tomando en consideración lo antes mencionado se empezaron a realizar pruebas con el primer sujeto para poder analizar los distintos efectos que los pulsos binaurales pueden tener en nuestro sueño.

El primer paso de la experimentación consiste en encontrar la frecuencia central de los tonos, la cual sea más cómoda para la persona esté siendo expuesta a los pulsos binaurales, se empezará con una frecuencia de 1000 Hz y se irá decrementando la frecuencia poco a poco hasta encontrar la mas idónea, cabe mencionar que estas pruebas se realizarán con una frecuencia de pulso binaural de 20 Hz, la cual por experimentación anterior se considera una frecuencia estándar.

9.2.1. Frecuencia central 1000 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz

En este caso el sujeto de prueba no fue capaz de conciliar el sueño debido a que el sonido es muy agudo, aunque el pulso binaural tenga una interpretación a nivel neurológico, debido a este experimento se cree que de primero al pasar por los órganos auditivos las frecuencias muy altas producen rechazo o molestia a la persona.

En esta frecuencia central es imposible dormir, aun variando la intensidad del sonido no se logra llegar a niveles de relajación óptimos para dormir, esta frecuencia mantiene alerta al sujeto de prueba.

9.2.2. Frecuencia central 500 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz

Con esta frecuencia central el sujeto pudo conciliar un sueño superficial, ya que oyendo el pulso binaural el mismo se dormía por etapas, eran breves etapas en los que se lograba dormir, se puede dormir con esta frecuencia central pero no es muy recomendable. A criterio del sujeto de prueba esta frecuencia central sigue siendo muy aguda, aunque ya se muestra resultados interesantes ya que en este caso el individuo si pudo dormir. Cabe mencionar que después de dos horas de pruebas el sujeto decidió no seguir debido a que era un poco molesto no llegar a un sueño profundo.

Características de la presente frecuencia central:

- Sueño superficial, no se puede dormir profundamente
- Sonido un tanto agudo

Cabe mencionar que en este caso se tuvo problema con los audífonos ya que era un poco incómodo dormir con audífonos de casco que cubren toda la oreja, esto se hizo debido a que el sonido se encuentra más aislado, pero en la siguiente prueba por comodidad se hará con audífonos *in ear* para observar que tanto influye el tamaño de los mismos, de no ser el caso se seguirá utilizando audífonos de casco.

9.2.3. Frecuencia central 250 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz

En este caso, se disminuyó por la mitad la frecuencia central de los pulsos a una frecuencia de 250 Hz. Los resultados con esta frecuencia central fueron bastante comprometedores, debido a que el sujeto de prueba pudo conciliar el sueño fácilmente. Algo que sucedió en esta etapa de prueba es que en algún momento de la noche el usuario de los audífonos se lo quita, pero esto es una variable que es difícil de controlar, debido a que es una acción involuntaria del usuario. Independientemente de las dificultades presentes en la actual prueba se puede hacer la aclaración que si se pudo dormir con un pulso binaural de frecuencia central 250 Hz y frecuencia de pulso binaural de 20 Hz.

Aunque en esta etapa se puede decir que se encontró un rango de frecuencias en las cuales los pulsos binaurales propician el sueño (250 Hz) se investigó a profundidad como

afectan distintos pulsos de frecuencias centrales más bajas, las cuales son explicadas en las siguientes secciones.

9.2.4. Frecuencia central 100 Hz, frecuencia de pulso binaural 20 Hz

La prueba con frecuencia central fue un poco desalentadora, debido a que anteriormente se tenía la idea que bajando la frecuencia central de pulsos binaurales se aumentaría la somnolencia de las personas. Pero en este caso aunque el sonido era totalmente adecuado para dormir, esto es un comentario del sujeto de prueba, no se logró dormir de manera tan fácil, se pudo conciliar el sueño, pero no de una manera tan rápida y efectiva como se esperaría, debido a esto se continuaron realizando pruebas con frecuencias centrales más bajas.

Estas pruebas que se realizaron son mayormente para encontrar un rango efectivo de frecuencias centrales, en las cuales se pueda conciliar el sueño, debido a que la característica más importante de los pulsos es la frecuencia de pulso binaural.

9.2.5. Frecuencia Central 50 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 20 Hz

En esta prueba con frecuencia central de 50 Hz, el examinador notó un fenómeno interesante, propio del generador, debido a que mientras se sigue disminuyendo la frecuencia central de los pulsos, para que el pulso se distinga de buena manera en los audífonos, esto debido a que cuando el volumen de salida de la Raspberry Pi es muy bajo no se escucha bien el pulso binaural, se escucha el audio generado como un tipo de ruido y no como el pulso binaural que se ha descrito anteriormente. Para evitar esto se debe de aumentar el volumen de salida de la Raspberry Pi, y en este caso se aumenta tanto para que se distinga bien el sonido que no es posible dormir con frecuencias centrales por debajo a los 100 Hz.

Debido a esto se descartó rango de frecuencias centrales menores de 100 Hz, ya que para que se distinga el sonido se debe de aumentar el sonido de manera tal, que no es posible dormir.

9.2.6. Opiniones Generales de Frecuencia Central

Habiendo realizado todas las pruebas descritas anteriormente se logró obtener un rango idóneo de frecuencia central que comprende desde los 100 Hz hasta los 300 Hz. Las cuales son frecuencias que según el sujeto de prueba son ideales para que la persona pueda descansar.

Posteriormente se realizaron pruebas para encontrar la frecuencia central, que tuviese frecuencia más baja posible y que la intensidad sonora de esta fuera la mínima para que se distinguiese el pulso binaural. De esta manera se encontró que la el rango entre 175 Hz y 220 Hz de frecuencia central sería el mejor para realizar las pruebas posteriores que indicarían las mejores frecuencias de pulso binaural.

9.3. Pruebas con Frecuencia de Pulso Binaural

Luego de haber encontrado un rango de frecuencias centrales de los pulsos, que es cómoda y podría ayudar a la conciliación del sueño. Se prosiguió con la elección de la frecuencia de pulso binaural. La primer prueba realizada se hizo con la frecuencia de pulso binaural más pequeña que en este caso debido al desarrollo de la aplicación e implementación de algoritmo es de 1 Hz, esta frecuencia de pulso binaural fue siendo incrementada, hasta llegar a un valor el cual ya no fuera cómodo el dormir, siendo la experimentación parecida a la anterior de la frecuencia central de los pulsos.

Es muy importante mencionar que la frecuencia central utilizada es de 175 Hz, esto debido a que como se menciona en la sección anterior, esta es la frecuencia más cómoda para dormir, tanto en su frecuencia central como en la intensidad sonora en la cual los pulsos se distinguen.

9.3.1. Frecuencia Central 175 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 1 Hz

En la primera prueba realizada para encontrar el rango de frecuencias de pulso binaural se obtuvieron buenos resultados, debido a que anteriormente para las pruebas de frecuencia central se utilizó una frecuencia de pulso binaural de 20 Hz, y se lograba conciliar el sueño pero tal vez no se tenía un efecto de somnolencia causado por el sonido, el cual si se obtuvo con la frecuencia de pulso binaural de 1 Hz. Se tuvo la sensación de un sueño profundo, según la experiencia del sujeto de prueba no es un sueño el cual sea instantáneo pero se logra que poco a poco el sujeto duerma.

Hay que mencionar que con esta frecuencia de pulso binaural los sonidos externos pueden resultar muy molestos, tales como sonidos de puertas abriéndose o cerrándose y también notificaciones en el celular. También el sujeto de pruebas experimentó pesadillas fuertes, pero estas pueden ser causadas por factores externos a los pulsos.

9.3.2. Frecuencia Central 175 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 5 Hz

En la presente prueba de frecuencia de pulso Binaural de 5Hz no se pudo recabar mucha información diferente de la frecuencia anterior, aunque cabe añadir que fue más sencillo dormir con la frecuencia de pulso binaural de 1 Hz.

Hay que añadir que el cansancio u otros factores exteriores a la persona pueden afectar su calidad del sueño, tales como el estrés entre otros. Debido a que estos factores no son tan controlables en este caso pudieron haber afectado estas pruebas.

9.3.3. Frecuencia Central 175 Hz, Frecuencia de Pulso Binaural 15 Hz - 50 Hz

Debido a las distintas pruebas que se llevaron a cabo a lo largo de esta etapa de pruebas del proyecto de implementación de pulsos binaurales, se prosiguió haciendo pruebas con

distintas frecuencias de pulsos binaurales, y, aunque se hicieron pruebas con distintos rangos de frecuencia de pulso binaural no se notó una diferencia significativa en la calidad del sueño aumentando la frecuencia entre 15 Hz y 50 Hz, debido a esto no se puede concluir algo en específico acerca del efecto de los pulsos binaurales en la calidad de sueño de las personas.

Es importante añadir que luego de los 50 Hz en el caso de la frecuencia de pulso binaural, se torna un poco molesto la utilización del dispositivo, y en vez de ayudar a la conciliación del sueño lo evitan. debido a lo anteriormente mencionado, el rango utilizado de frecuencia de pulso binaural puede ser desde 1 Hz hasta 50 Hz.

9.3.4. Condiciones de Trabajo

A lo largo de la experimentación e implementación de este proyecto se tomo en consideración muchas variables externas que pudiesen afectar el resultado del mismo. Esto debido a que dependiendo de la actividad mental o física que un usuario de el dispositivo pueda afectar el resultado al momento de dormir.

Las características que pueden afectar el sueño son muchas , pero a lo largo de estas pruebas se pudieron identificar algunas que se consideran las más importantes a tomar en cuenta:

- Cansancio físico
- Cansancio mental
- Utilización excesiva del celular antes de dormir
- Ruido externo

Aunque no son todas las situaciones en las cuales se puede afectar a la prueba, estas son las más importantes. Ya que muchas veces el sujeto de prueba iba al gimnasio en la noche y debido a eso dormir resultaba fácil, en otras situaciones se tenían muchas actividades para el día siguiente entonces la preocupación hacia que el usuario no lograse conciliar el sueño tan fácilmente. Es importante que las pruebas se lleven a cabo con condiciones lo más parecidas posibles para poder evaluar posteriormente los resultados con los mismos estándares.

9.4. Conclusiones Generales: Frecuencia Central y Frecuencia de pulso Binaural

Ya habiendo realizado las pruebas de Frecuencia Central y Frecuencia de pulso Binaural con el dispositivo creado, se llegaron a algunas conclusiones que serían importantes recalcar para el actual capítulo. Se obtuvieron rangos tanto de frecuencia de pulso binaural como de frecuencia central:

- Frecuencia central 170 - 300 Hz

- Frecuencia de pulso binaural 1 - 50 Hz

Algo muy importante a mencionar con respecto a estas pruebas es que no se pudo relacionar directa la calidad de los pulsos binaurales con la calidad del sueño, ya que no hubo diferencia notable la cual pudiese definir que los pulsos binaurales de cierta frecuencia ayudan más o menos a la conciliación del sueño.

CAPÍTULO 10

Conclusiones

- Se logró desarrollar un generador de pulsos binaurales en un dispositivo compacto y de bajo costo.
- La banda de frecuencias centrales más cómodas para conciliar el sueño comprende entre 175 Hz y 220 Hz
- Fue posible el desarrollo de una interfaz gráfica amigable con el usuario, la cual le permite generar y escuchar pulsos binaurales.
- Debido a las características del proyecto es posible implementar una aplicación en la que corran múltiples procesos por medio de Programación Orientada a Objetos.

CAPÍTULO 11

Recomendaciones

- Investigar e implementar una manera de poder analizar un análisis cuantitativo de los efectos de los pulsos binaurales en las señales electro encefalográficas.
- Encontrar las frecuencias de pulsos binaurales que ayuden a conciliar el sueño
- Realizar mejoras en la interfaz gráfica para que esta sea más amigable
- Implementación con lectura de datos de señales EEG en conjunto con reproducción y generación de pulsos binaurales.
- Tomar en cuenta las variables externas a las cuales el usuario puede estar expuesto antes de dormir, tales como cansancio, o exposición prolongada al celular.

CAPÍTULO 12

Bibliografía

- [1] J. P. M. Nuñez, *Diseño de un sistema inteligente de monitoreo de ondas EEG y generador de pulsos binaurales para combatir desordenes de sueño en los atletas*, Trabajo de graduación, nov. de 2019.
- [2] L. Chaileb, E. Wilpert, P. Reber y J. Fell, “Auditory Beat Stimulation and its Effects on Cognition and Mood States”, *Frontiers in Psychiatry*, vol. 6, n.º 70, mayo de 2015.
- [3] M. Lee, C. Song, G. Shin y S. Lee, “Possible Effect of Binaural Beat Combined With Autonomous Sensory Meridian Response for Inducing Sleep”, *Front Hum Neurosci*, n.º 13, pág. 425, dic. de 2019.
- [4] A. Collado, O. Sánchez, A. Almanza, E. Arch e Y. Arana, “Epidemiología de los trastornos del sueño en población mexicana: seis años de experiencia en un centro de tercer nivel.”, *Asociación médica ABC*, vol. 61, n.º 2, jun. de 2016.
- [5] A. Priyanka A., *Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition*. Londres): Academic Press, 2016, ISBN: 978-0-12-804490-2.
- [6] J. Satheesh y P. Bhunavaneswari, “Analysis of Electroencephalography (EEG) Signals and Its Categorization–A Study”, *Procedia Engineering*, vol. 38, jun. de 2012, Special Issue: Edición especial.
- [7] V. Salud, *La Actividad Cerebral*, <http://neurofisiologiagranada.com/eeg/eeg-actividadcerebral.htm>, Obtenido de NEUROFISIOLOGÍA MÁLAGA.
- [8] J. Tejeiro, *ELECTROENCEFALOGRAFIA CLINICA BASICA*. Barcelona): VIGUE-RA EDITORES, 2008, ISBN: 9788485424559.
- [9] *Natural Patterns of Sleep*, <http://healthysleep.med.harvard.edu/healthy/science/what/sleep-patterns-rem-nrem>, Accessed: 2019-10-5.
- [10] G. Stores, “General outline of sleep and its disorders in children and adolescents”, en *Sleep and its Disorders in Children and Adolescents with a Neurodevelopmental Disorder: A Review and Clinical Guide*. Cambridge University Press, 2014, págs. 9-52. DOI: 10.1017/CBO9780511972935.002.
- [11] P. L. Fernández, “Conceptos físicos de las ondas sonoras”, *Física y Sociedad, Revista del Colegio Oficial de Físicos*, n.º 11, 2000.

- [12] J. A. Gottfried, *Neurobiology of Sensation and Reward*. Boca Raton (FL): Department of Neurology Northwestern University, Feinberg School of Medicine, Chicago, Illinois, 2011, ISBN: 978-1-4200-6726-2.
- [13] N. Jirakittayakorn e Y. Wongsawat, “A Novel Insight of Effects of a 3-Hz Binaural Beat on Sleep Stages During Sleep”, *Frontiers in human neuroscience*, vol. 12, n.^o 387, sep. de 2018.
- [14] J. Licklider, “On the Frequency Limits of Binaural Beats”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 322, n.^o 468, 1950.
- [15] C. Beauchene, N. Abaid, R. Moran, R. Diana y A. Leonessa, “The Effect of Binaural Beats on Visuospatial Working Memory and Cortical Connectivity”, *PLoS ONE*, vol. 11, n.^o 11, nov. de 2016.
- [16] E. Montnémery y J. Sandvall, *Ogg/Vorbis in embedded systems*, 2004.
- [17] L. of Congress, *Broadcast WAVE Audio File Format*, <https://www.loc.gov/preservation/digital/format/> Obtenido de la Library of Congress, dic. de 2009.
- [18] *Raspberry Pi 4*, <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>, Accessed: 2019-15-5.
- [19] S. Johnston y S. Cox, “The Raspberry Pi: A Technology Disrupter, and the Enabler of Dreams”, *Electronics*, vol. 6, n.^o 3, pág. 51, jul. de 2017.
- [20] P. TM, *What is Python? Executive Summary*, <https://www.python.org/>.