

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño e Implementación de un Sistema Generador de Pulsos  
Binaurales para el Estudio del Impacto de los Pulsos 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







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño e Implementación de un Sistema Generador de Pulsos  
Binaurales para el Estudio del Impacto de los Pulsos 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 Rivera

Tribunal Examinador:

(f) \_\_\_\_\_  
Dr. Luis Rivera

(f) \_\_\_\_\_  
MSc. Carlos Esquit

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Luis Pedro Montenegro

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2018.









<b>Prefacio</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>11</b>
6.1. Señales EEG . . . . .	11
6.2. Etapas del sueño . . . . .	13
6.3. Ondas Sonoras . . . . .	14
6.3.1. Interpretación Física de las ondas sonoras . . . . .	14
6.3.2. Interpretación neuronal de las ondas sonoras . . . . .	15
6.4. Pulsos binaurales . . . . .	15
6.5. Formatos digitales de sonido . . . . .	17
6.6. Análisis en el espectro de frecuencia . . . . .	17
6.7. Raspberry Pi . . . . .	17
6.8. Python . . . . .	17

<b>7. Implementación de Generador de Pulsos Binaurales en Raspberry Pi 3</b>	<b>19</b>
7.1. Familiarización con Python en Raspberry Pi 3 . . . . .	19
7.2. Migración de programa . . . . .	20
7.2.1. Problemática de reproducción de sonido entre Python y Raspberry Pi	21
7.3. Evaluación funcionamiento de programa . . . . .	22
<b>8. Interfaz Gráfica</b>	<b>27</b>
8.1. Herramientas utilizadas para la Interfaz Gráfica . . . . .	27
8.1.1. Pantalla Táctil 7" . . . . .	27
8.2. Tkinter . . . . .	29
8.3. Desarrollo de Interfaz Gráfica . . . . .	29
<b>9. Pruebas e implementación</b>	<b>31</b>
9.1. Frecuencias centrales y diferencia de tonos no idóneos . . . . .	31
<b>10. Conclusiones</b>	<b>33</b>
<b>11. Recomendaciones</b>	<b>35</b>
<b>12. Bibliografía</b>	<b>37</b>
<b>13. Anexos</b>	<b>39</b>
13.1. Planos de construcción . . . . .	39
<b>14. Glosario</b>	<b>41</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Onda Delta, obtenida de: [5] . . . . .	11
2.	Onda Theta, obtenida de: [5] . . . . .	12
3.	Onda Alpha, obtenida de: [5] . . . . .	12
4.	Onda Beta, obtenida de: [5] . . . . .	12
5.	Onda Gamma, obtenida de: [5] . . . . .	12
6.	Señales EEG etapa REM obtenidas de: [6] . . . . .	13
7.	Señales EEG etapa NREM obtenidas de: [6] . . . . .	13
8.	Rango Audible de Frecuencias y su nivel de presión sonora en dB [7] . . . . .	15
9.	Diagrama pulso binaural obtenido de: [8] . . . . .	16
10.	Fotografía Raspberry Pi obtenido de: [11] . . . . .	17
11.	Salida generador de Pulsos Binaurales . . . . .	20
12.	Archivo .wav . . . . .	20
13.	Código para reproducir archivo de audio . . . . .	21
14.	Error al utilizar archivo .wav . . . . .	21
15.	Pulso Binaural obtenido . . . . .	23
16.	Código para análisis en el tiempo . . . . .	23
17.	Pulso Binaural obtenido (1 s) . . . . .	24
18.	Código Análisis de Espectro de frecuencias . . . . .	24
19.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Derecho . . . . .	25
20.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Izquierdo . . . . .	25
21.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Pulso Binaural . . . . .	26
22.	Conexiones de Raspberry Pi a Pantalla Táctil de 7" . . . . .	28
23.	Vista de Frente Sistema Pantalla Táctil-Raspberry . . . . .	28



---

## Lista de cuadros

---





El presente trabajo es motivado por 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 plantea 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) de nuestro 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 enfocará en la utilización de 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 es poder replicar pulsos binaurales en un dispositivo cómodo para los usuarios, y de bajo costo.

Finalmente, al tener un prototipo funcional de replicación de pulsos binaurales, se realizarán 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 is an abstract of the study developed under the



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

El presente trabajo escrito y su proyecto correspondiente, es realizado para obtener el título de Ingeniero en Mecatrónica en grado de licenciado por parte del escritor y desarrollador de los mismos tópicos mencionados anteriormente. Esto se logra realizando un trabajo 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, debido a esto se realiza una investigación que encausa al investigador en el tema de los pulsos binaurales, los cuales podrían solucionar las afecciones de sueño de las personas.

A grandes rasgos se busca teniendo un dispositivo fácil de utilizar, 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 audifonos conectados a alguna fuente de sonido. Cabe recalcar que el sonido 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 un dispositivo el cual fuese más cómodo y mas práctico a la hora de utilizarlo (en este caso se utilizó la Raspberry Pi y una pantalla compatible de 7"). Luego de haberse adaptado 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 de una manera científica que este tipo de excitación sonora puede ayudar a los distintos trastornos de sueño.

Esta tesis queda abierta para investigación posterior, uniendola con análisis de señales Electro Encefalográficas (EEG) para poder analizar el efecto no solo cualitativo sino cuantitativo de los pulsos binaurales en las personas.



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 (por auriculares) al sujeto de prueba. 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 las etapas del sueño. Esto ha llevado a científicos en el mundo ha 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 línea 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.

Tomando en consideración los estudios anteriormente mencionados, tenemos evidencia prometedora que esta tesis tenga resultados satisfactorios.



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 propone 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.



#### **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

---

Podemos usar Latex para escribir de forma ordenada una fórmula matemática.



## 6.1. Señales EEG

Las señales EEG, son causadas por los pulsos eléctricos generados por el cerebro, el interés de investigar este tipo de señales es que el cerebro es el órgano que manda instrucciones a los demás órganos para que dichos realicen sus actividades adecuadamente, se torna más interesante cuando sabemos que ciertas partes del cerebro controlan ciertos movimientos de partes del cuerpo, relacionando esto dependiendo del lugar del cerebro que estemos recibiendo las señales, podemos tener una noción de las instrucciones que este está enviando.[5]

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. Es anormal en adultos generalmente se da en bebés durmiendo.



Figura 1: Onda Delta, obtenida de: [5]

**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.



Figura 2: Onda Theta, obtenida de: [5]

**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.



Figura 3: Onda Alpha, obtenida de: [5]

**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.



Figura 4: Onda Beta, obtenida de: [5]

**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.



Figura 5: Onda Gamma, obtenida de: [5]



## 6.2. Etapas del sueño

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo tenemos que 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[6] que nos mencionan que muchas personas al ser despertada en esta etapa dicen haber soñado. 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 6: Señales EEG etapa REM obtenidas de: [6]

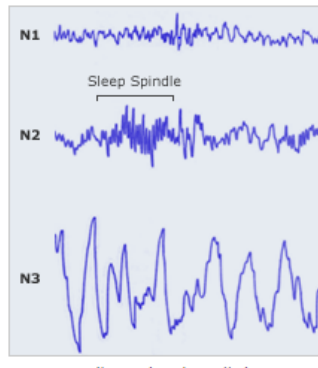


Figura 7: Señales EEG etapa NREM obtenidas de: [6]

## 6.3. Ondas Sonoras

### 6.3.1. Interpretación Física de las ondas sonoras

El sonido, según [7], 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 20,00 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 [7] (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.

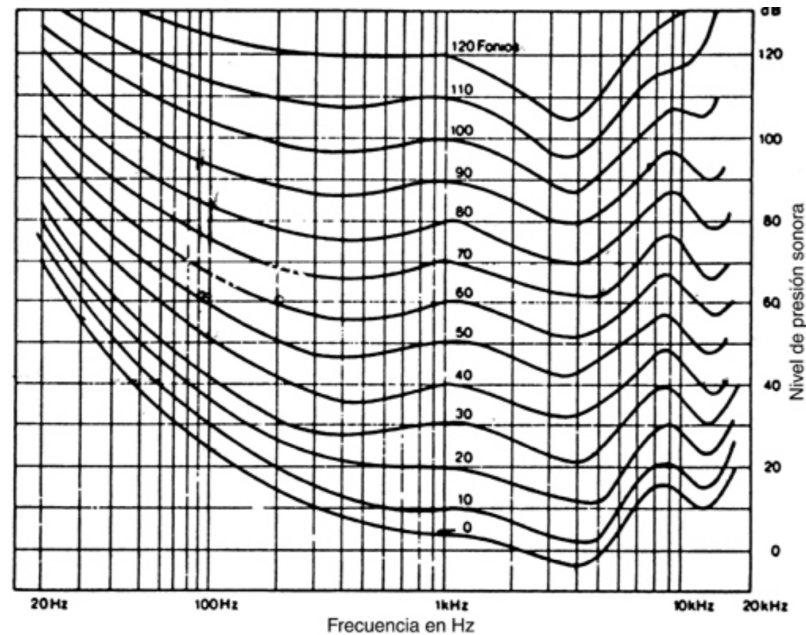


Figura 8: Rango Audible de Frecuencias y su nivel de presión sonora en dB [7]

### 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.

## 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 [8]: 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.

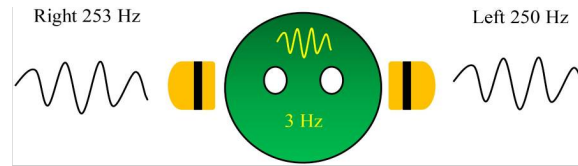


Figura 9: Diagrama pulso binaural obtenido de: [8]

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.

Considerando que los pulsos binaurales al final son un sonido que se desea transmitir, debemos de saber cual es el rango de frecuencias en los cuales estos pulsos son percibidos por el ser humano, en [9] 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-córtica, 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. [10]

## 6.5. Formatos digitales de sonido

## 6.6. Análisis en el espectro de frecuencia

## 6.7. 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 corre 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.

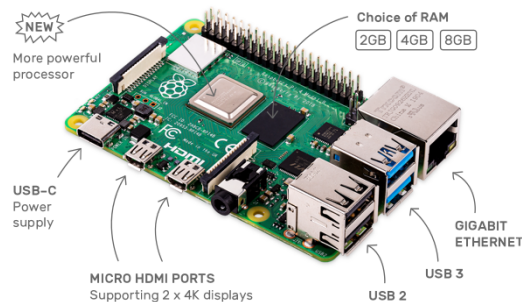


Figura 10: Fotografía Raspberry Pi obtenido de: [11]

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, I<sup>2</sup>C, 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 [12].

## 6.8. Python



---

## 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.

### 7.1. Familiarización con Python en Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi, tiene incorporados varios modulos para poder correr programas en Python en la misma, estos 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 .

Hay una cosa 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. Debido a esto se encuentran algunos errores al momento de implementación, que con la investigación debida se van solucionando.

## 7.2. Migración de programa

A grandes rasgos el algoritmo es bastante similar al desarrollado por José Pablo Muñoz en [1] ya que esta tesis se enfoca mayormente en el desarrollo de la aplicación funcional en la raspberry Pi. Para el generador se tuvieron que utilizar las siguientes librerías de Ppython:

- numpy
- scipy

Que 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 nuestras 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)
('Binaural0.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 11: Salida generador de Pulsos Binaurales

En este caso 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 12: Archivo .wav



Habiendo generado satisfactoriamente un archivo, se corroboré 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. A la espera de una verificación más exhaustiva se da un visto bueno a la migración del programa de Python a 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, se dejó un poco del lado la reproducción del audio en el mismo programa de Python, ya que este proporcionó muchos problemas a la hora de reproducir los archivos generados por el programa. Esto no es un problema al azar, debido a que la librería que se está usando en este caso es:

- pygame

Esta librería tiene un problema, no se pueden reproducir archivo wav de 32 bits, sino que solamente de archivos de la misma denominación de 16 bits. Se corroboró la teoría con la práctica utilizando el siguiente código:

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

Figura 13: 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:

```
>>> playbinaural("Binaural0.wav")  
Traceback (most recent call last):  
  File "<pyshell>", line 1, in <module>  
    File "/home/pi/Desktop/Isais Luis Guerrero/GeneradorPARCIAL.py", line 92, in playbinaural  
      sonido = pygame.mixer.Sound(filename)  
pygame.error: unable to open file 'Binaural0.wav'
```

Figura 14: Error al utilizar archivo .wav

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

Un problema en general de utilizar archivos wav en Debian, 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, obteniendo resultados satisfactorios, la solución del problema es utilizar este tipo de archivos para que sean reproducidos con mayor facilidad en Python. El problema es que no se ha hallado una manera desde Python para hacer una conversión de archivo wav a OGG o directamente una generación directa de un archivo OGG, esto se resolverá en la etapa de la realización de interfaz gráfica.

### 7.3. Evaluación funcionamiento de programa

Luego de haber logrado la generación del pulso binaural deseado, nos encontramos con la problemática de la verificación del buen funcionamiento del programa. debido a esto se tuvo que realizar 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, el cual tiene 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 esta tesis, ya que esta depende de sobremanera 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:

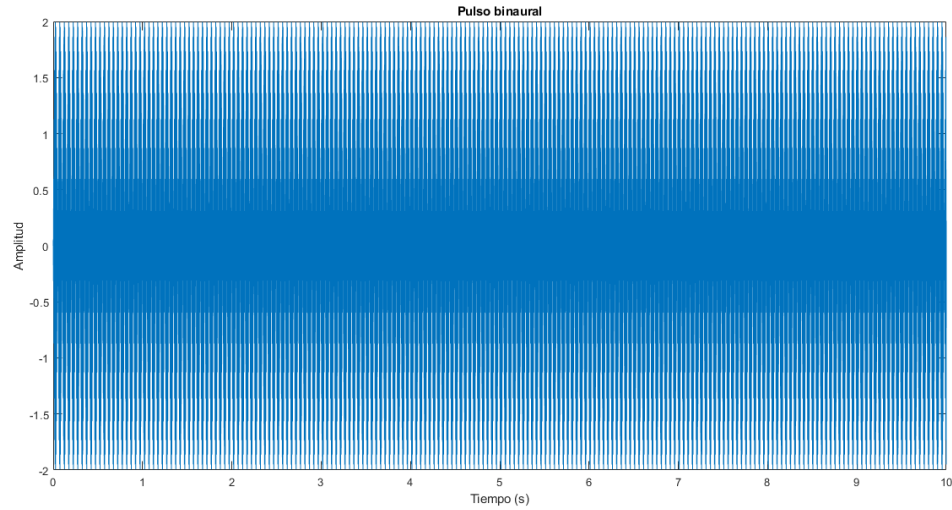


Figura 15: Pulso Binaural obtenido

Como se aprecia en la figura anterior, el programa está generando de manera correcta el tiempo del pulso, el cual se determinó que fuese de 10 s, cabe mencionar que en Matlab para ajustar este tipo de mediciones hay que hacer algunos cambios sencillos, ya que generalmente cuando se grafica archivos de sonido, o cualquier archivo que tenga una frecuencia de muestreo, antes de hacer un ajuste, la gráfica está definida por el número de muestras, lo que se debe de realizar para tener un buen marco de referencia en segundos y no por muestras es demostrado en el siguiente código de Matlab:

```
%Definimos el pulso binaural que se interpretaría
binaural_beat= right_channel-left_channel;
%Definimos t, dependiendo del tamaño de nuestro archivo wav y la frecuencia
%de muestreo fs
t= (0:441000-1) / fs;
plot(t,binaural_beat);
title('Pulso binaural');
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud')
```

Figura 16: Código para análisis en el tiempo

Que a grandes rasgos lo que hace es tomar en cuenta la frecuencia de muestreo para poder dividir esta por la cantidad de muestras, obteniendo así la cantidad de segundos que en este caso el archivo .wav de sonido tiene.

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:

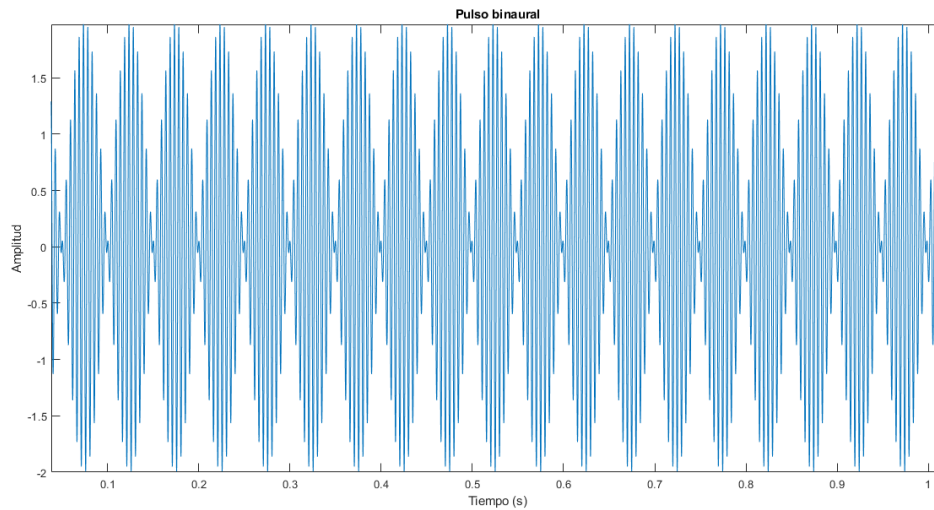


Figura 17: Pulso Binaural obtenido (1 s)

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 fft en Matlab, haciendo algunos ajustes que se lograrán apreciar a continuación.

Hay un método en Matlab, que es utilizado especialmente en la FFT (Fast Fourier Transform), 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.

```
%Definimos el pulso binaural que se interpretaría
binaural_beat= right_channel-left_channel;
Fs = 44100; % Frecuencia de muestreo
T = 1/Fs; % Periodo de la señal
L = length(y); % Tamaño de la señal
t = (0:L-1)*T; % Vector de Tiempo
NFFT = 2^nextpow2(L);
Y = fft(binaural_beat,NFFT)/L;
f = Fs/2* linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Graficamos espectro de frecuencias single-sided
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Análisis de Espectro de frecuencias canal izquierdo')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
```

Figura 18: Código Análisis de Espectro de frecuencias

Ya teniendo este código, se realizó la medición tanto de ambos canales por separado, tanto como de la resta de ambos, obteniendo los siguientes resultados:

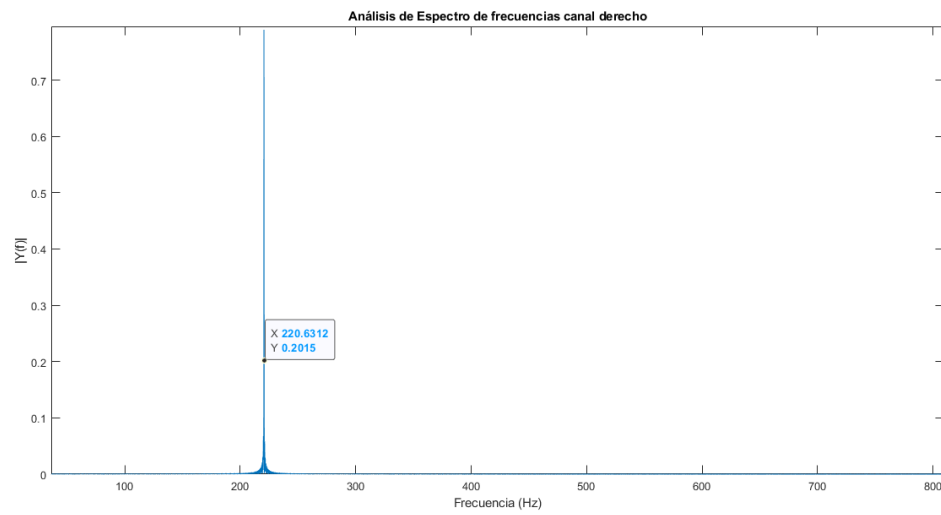


Figura 19: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Derecho

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

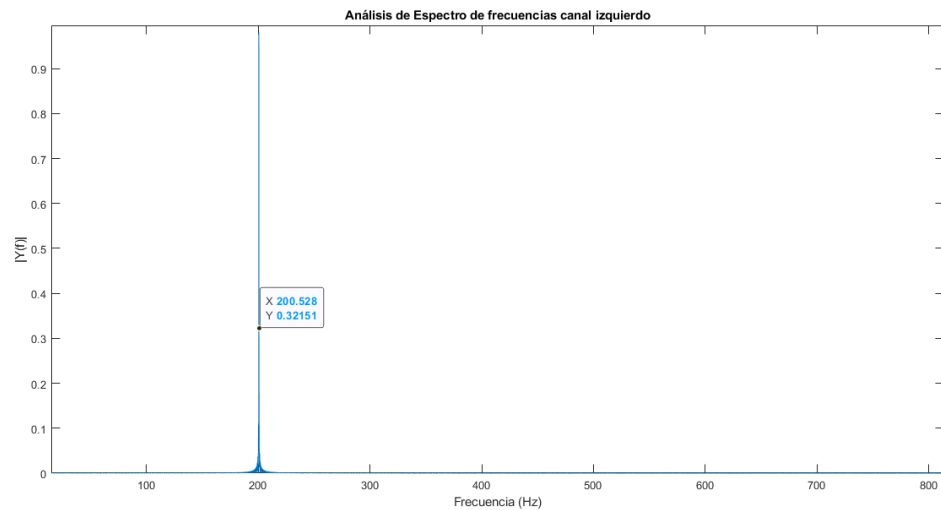


Figura 20: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Izquierdo

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.

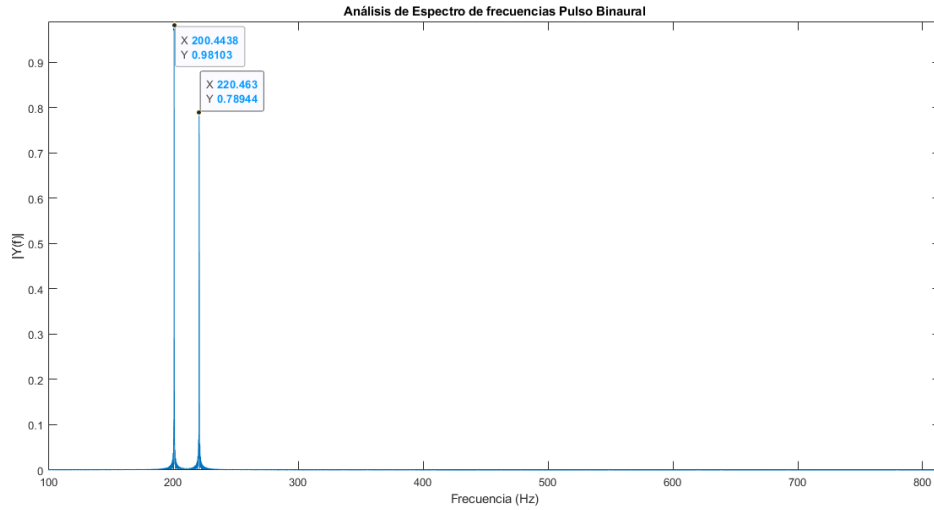


Figura 21: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Pulso Binaural

Para finalizar con la verificación se analiza también el espectro de frecuencias del pulso binaural generado, 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 separa.

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.

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 (a gran escala por supuesto). 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, como estética, acorde a 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 discutió con el asesor, 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, a 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.

Sin querer ahondar en aspectos técnicos de la Pantalla, 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 soon bastantes sencillas, estas solamente son conexiones de 4 jumpers de la pantalla LED a la Raspberry P, y un *Ribbon Cable* o cable de multiples hilos que va a la entrada de este tipo en la raspberry Pi, como se muestra en las siguientes fotos.



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.

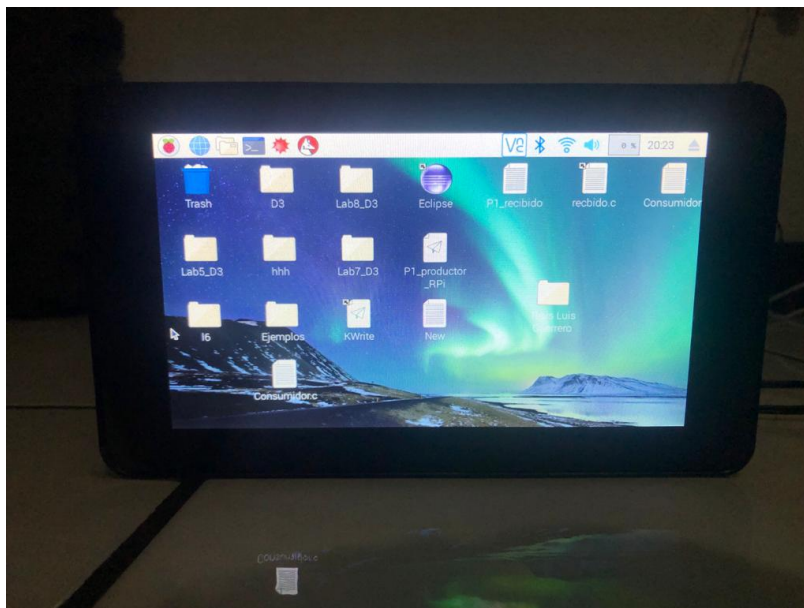


Figura 23: Vista de Frente Sistema Pantalla Táctil-Raspberry



## 8.2. Tkinter

Como se mencionó anteriormente, la interfaz gráfica es una parte importante de estas tesis, 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 libre es simple y aunque no deje estilizar mucho los botones y los inputs en general, siempre se pueden utilizar imágenes, lo cual es algo muy bueno, ya que provoca que esta librería de Tkinter sea tanto funcional como bastante estética, lo cual se irá mostrando en las secciones posteriores de este capítulo.

## 8.3. Desarrollo de Interfaz Gráfica



---

### Pruebas e implementación

---

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. Este capítulo ahonda un poco más en la experiencia del usuario, dejando por un lado los prototipos y desarrollos, llegando a una opinión personal.

Cabe destacar que por la pandemia causada por el COVID-19 las pruebas se realizaron a un grupo pequeño de personas, comenzando solamente por el estudiante Luis Guerrero, y su familia.

#### 9.1. Frecuencias centrales y diferencia de tonos no idóneos

Esta etapa 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 insoportables, 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 con 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, lo que garantizaba que los resultados fueran más homogéneos entre si. (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 alta de 10,000 Hz, la cual aunque es audible, no presenta 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, hasta llegar a 1000 Hz, que aunque no es un sonido muy agradable para el examinador, no es insoportable 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. Cabe mencionar que es muy importante la intensidad del sonido, ya que a frecuencias más altas, se puede tornar el sonido insoportable, también hay que considerar que cuando el sonido no es tan intenso se puede perder la frecuencia del pulso binaural, debido a esta prueba preliminar debemos de tomar en cuenta lo antes descrito/

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 x 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 llego 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 der ser de 1 a 1000 Hz
- Hay que tomar en consideración la intensidad del sonido a mayores frecuencias

Cabe mencionar que se había cometido un error previo, en el cual se había descartado todas las frecuencias mayores a 250 Hz, pero haciendo una prueba extensiva e incluyendo la intensidad del sonido se llegó a los postulados descritos anteriormente.

## CAPÍTULO 10

---

Conclusiones

---



## CAPÍTULO 11

---

Recomendaciones

---





- [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] 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.
- [6] *Natural Patterns of Sleep*, <http://healthysleep.med.harvard.edu/healthy/science/what/sleep-patterns-rem-nrem>, Accessed: 2019-10-5.
- [7] P. L. Fernández, “Conceptos físicos de las ondas sonoras”, *Física y Sociedad, Revista del Colegio Oficial de Físicos*, n.º 11, 2000.
- [8] 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.
- [9] J. Licklider, “On the Frequency Limits of Binaural Beats”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 322, n.º 468, 1950.
- [10] 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.
- [11] *Raspberry Pi 4*, <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>, Accessed: 2019-15-5.

- [12] 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.

## CAPÍTULO 13

---

Anexos

---

### 13.1. Planos de construcción



## CAPÍTULO 14

---

### Glosario

---

**fórmula** Una expresión matemática. 9

**latex** Es un lenguaje de marcado adecuado especialmente para la creación de documentos científicos. 9