

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>
6.0.1. Ondas Sonoras . . . . .	14
6.0.2. Archivos multimedia OGG . . . . .	15
6.0.3. Análisis en el espectro de frecuencia . . . . .	15
<b>7. Implementación de Generador de Pulsos Binaurales en Raspberry Pi 3</b>	<b>17</b>
7.1. Familiarización con Python en Raspberry Pi 3 . . . . .	17
7.2. Migración de programa . . . . .	18
7.2.1. Problemática de reproducción de sonido entre Python y Raspberry Pi	19
7.3. Evaluación funcionamiento de programa . . . . .	20
<b>8. Control del sistema mecánico</b>	<b>25</b>
8.1. La ecuación del manipulador . . . . .	25

<b>9. Conclusiones</b>	<b>27</b>
<b>10.Recomendaciones</b>	<b>29</b>
<b>11.Bibliografía</b>	<b>31</b>
<b>12.Anexos</b>	<b>33</b>
12.1. Planos de construcción . . . . .	33
<b>13.Glosario</b>	<b>35</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.	Diagrama pulso binaural obtenido de: [7]	14
9.	Fotografía Raspberry Pi obtenido de: [10]	15
10.	Salida generador de Pulsos Binaurales	18
11.	Archivo .wav	18
12.	Código para reproducir archivo de audio	19
13.	Error al utilizar archivo .wav	19
14.	Pulso Binaural obtenido	21
15.	Código para análisis en el tiempo	21
16.	Pulso Binaural obtenido (1 s)	22
17.	Código Análisis de Espectro de frecuencias	22
18.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Derecho	23
19.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Izquierdo	23
20.	Análisis Espectro de Frecuencias Canal Pulso Binaural	24



---

## Lista de cuadros

---

1.	Tabla de prueba . . . . .	25
----	---------------------------	----





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

---

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Quisque eget consequat risus. Praesent a quam lacinia, consequat eros id, auctor tellus. Phasellus a dapibus arcu, vitae luctus leo. Aliquam erat volutpat. Suspendisse ac velit quam. Nullam risus nibh, lobortis vehicula elit non, pellentesque volutpat odio. Donec feugiat porta sapien gravida interdum. Cras odio nunc, lobortis sed pellentesque imperdiet, facilisis eu quam. Praesent pharetra, orci at tincidunt lacinia, neque nulla ornare lacus, ut malesuada elit risus non mi. Fusce pellentesque vitae sapien sed mollis. Curabitur viverra at nulla vitae porta. In et mauris lorem.

Vestibulum faucibus fringilla justo, eget facilisis elit convallis sit amet. Morbi nisi metus, hendrerit quis pellentesque non, faucibus at leo. Proin consectetur, est vel facilisis facilisis, arcu felis vestibulum quam, et fringilla metus neque at enim. Nunc justo mauris, egestas quis maximus eget, viverra vehicula nunc. Fusce eu nulla elementum, condimentum diam at, aliquam leo. Nullam sed sodales enim, eu imperdiet risus. Aliquam ornare augue leo, fringilla mattis nunc facilisis eget. Nam faucibus, libero a aliquet fermentum, magna arcu ultrices lacus, a placerat tortor turpis ut purus.

Integer eget ligula non metus egestas rutrum sit amet ut tellus. Aliquam vel convallis est, eu sodales leo. Proin consequat nisi at nunc malesuada gravida. Aliquam erat volutpat. Aliquam finibus interdum dignissim. Etiam feugiat hendrerit nisl, hendrerit feugiat ex malesuada in. Cras tempus eget arcu vitae congue. Ut non tristique mauris. Vivamus in mattis ipsum. Cras bibendum, enim bibendum commodo accumsan, ligula nulla porttitor ex, et pharetra eros nisl eget ex. Morbi at semper arcu. Curabitur massa sem, maximus id metus ut, molestie tempus quam. Vivamus dictum nunc vitae elit malesuada convallis. Donec ac semper turpis, non scelerisque justo. In congue risus id vulputate gravida. Nam ut mattis sapien.



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.



## 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]



## 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]

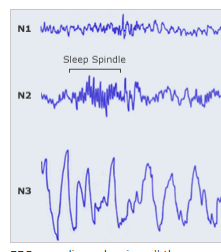


Figura 7: Señales EEG etapa NREM obtenidas de: [6]

### 6.0.1. Ondas Sonoras

#### 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 [7]: 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.

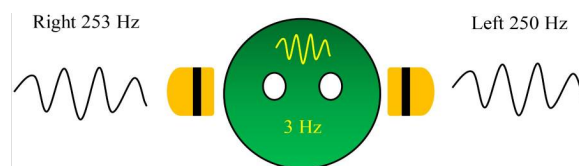


Figura 8: Diagrama pulso binaural obtenido de: [7]

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 [8] 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 caos 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. [9]

### 6.0.2. Archivos multimedia OGG

### 6.0.3. Análisis en el espectro de frecuencia

## 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.

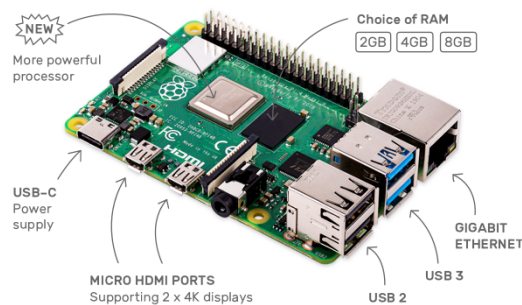


Figura 9: Fotografía Raspberry Pi obtenido de: [10]

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 [11].

---

## 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 10: 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 11: 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 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:

```
>>> 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 13: 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:



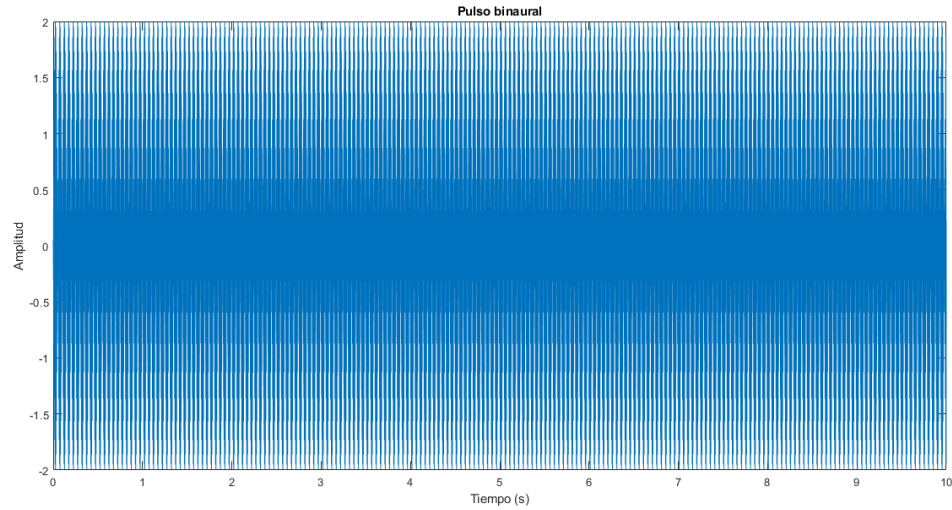


Figura 14: Pulso Binaural obtenido

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 15: 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:

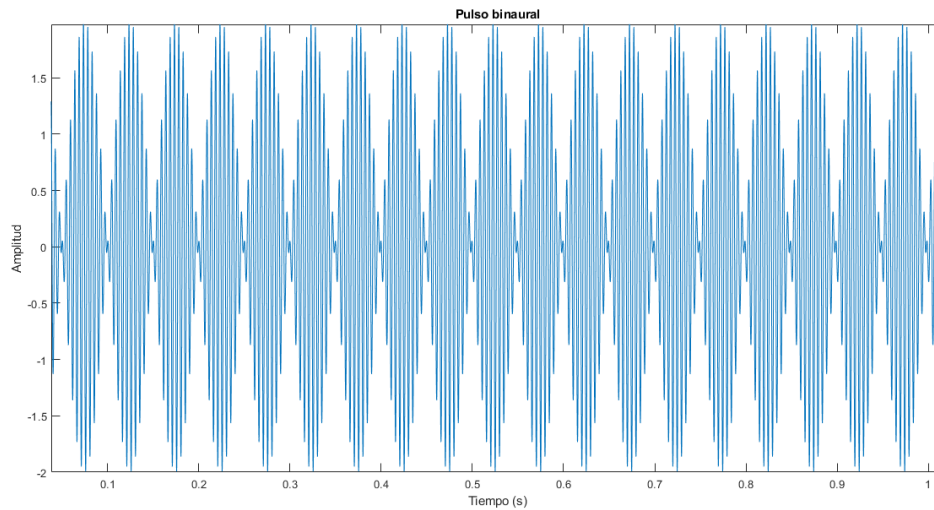


Figura 16: Pulso Binaural obtenido (1 s)

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 17: 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:

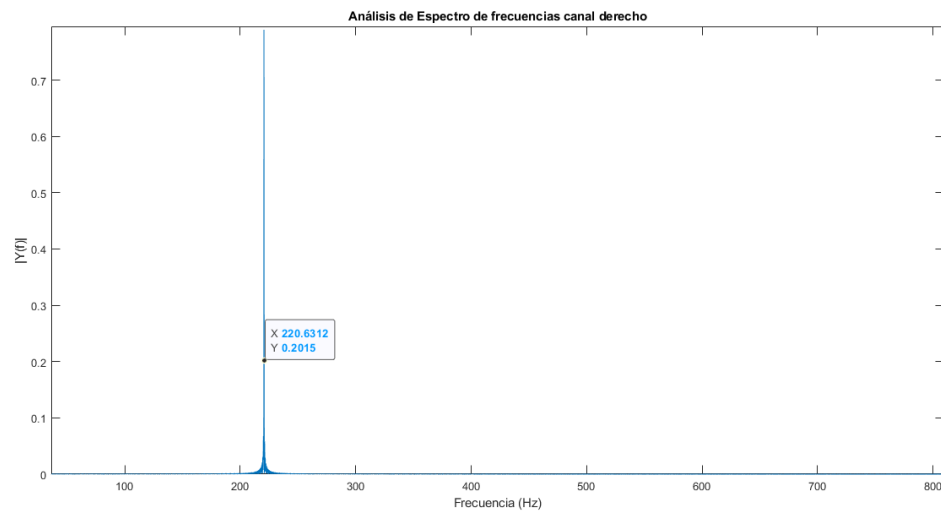


Figura 18: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Derecho

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

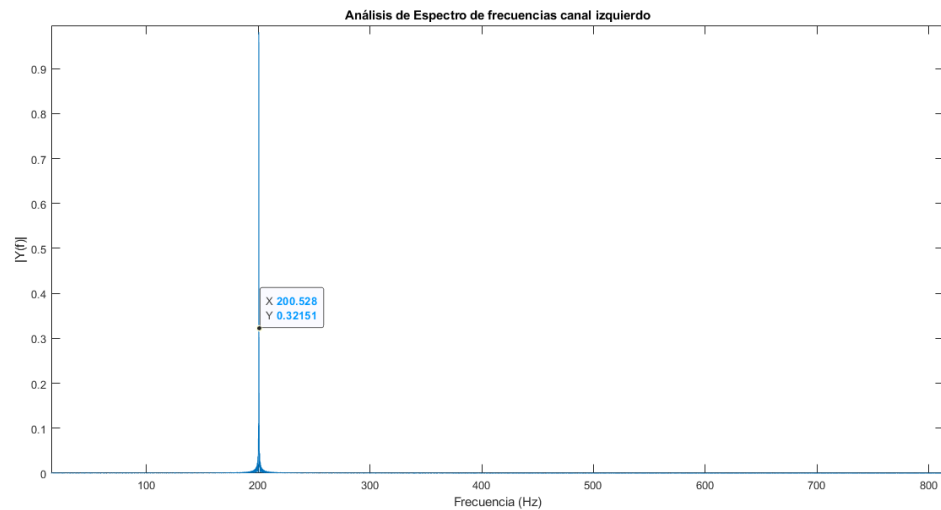


Figura 19: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Izquierdo

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.

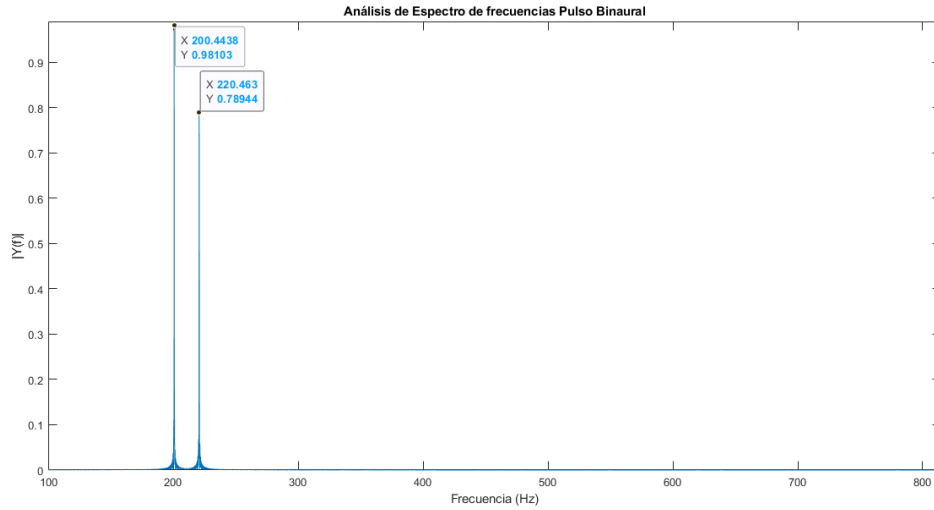


Figura 20: Análisis Espectro de Frecuencias Canal Pulso Binaural

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.

### 8.1. La ecuación del manipulador

12	3.2	3.43	23	13
aasdasdd	asd	ssdssa	ssdas	asdasda

Cuadro 1: Tabla de prueba. Esta es una breve descripción de la tabla anterior. Continuamos con la descripción de esta forma y se menciona que fue de elaboración propia.

Aquí seguimos escribiendo texto normalmente.



## CAPÍTULO 9

---

Conclusiones

---





## CAPÍTULO 10

---

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] 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.
  - [8] J. Licklider, “On the Frequency Limits of Binaural Beats”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 322, n.º 468, 1950.
  - [9] 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.
  - [10] *Raspberry Pi 4*, <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>, Accessed: 2019-15-5.
  - [11] 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 12

---

Anexos

---

### 12.1. Planos de construcción



## CAPÍTULO 13

---

### Glosario

---

**fórmula** Una expresión matemática. 9

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