

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Estudio del Impacto de un Sistema Integrado de Detección de
Patrones de Señales Biomédicas y de Generación de Pulsos
Binaurales en la Calidad del Sueño de las Personas**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Diego Alejandro
Alegría Ochoa, estudiante de Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2021

Resumen

En este protocolo se propone un trabajo de graduación que busca integrar fases previas para el desarrollo de un sistema de clasificación automática de las etapas de sueño que además produce pulsos binaurales para disminuir las afecciones producidas por trastornos del sueño. En la fase anterior del proyecto se desarrollo un sistema clasificador, el cual fue entrenado con algoritmos de aprendizaje de máquina alimentado por la información obtenida por dispositivos especializados en la captura de datos bioeléctricos, específicamente el *Electro-Cap* como dispositivo de electrodos de superficie y recolectado por la *Cyton Board* la cuál en conjunto forman un sistema capaz de realizar encefalogramas y enviar esta información a una computadora para su posterior almacenamiento.

En la fase previa también se desarrolló el dispositivo de producción de pulsos binaurales el cual fue una adaptación de una primera fase, la cual se desarrolló para una computadora. Esta vez se migró a una *Raspberry Pi* la cual nos permite movilidad y además una aproximación a un sistema embebido el cuál puede ser empotrado en clínicas de sueño para facilitar los análisis. Por lo tanto, este trabajo pretende una integración del sistema de clasificación automático para detectar patrones y anomalías y el sistema de generación de pulsos binaurales para corregir estas afecciones y por último realizar un profundo análisis estadístico de comparación de medias para probar si existe o no un cambio significativo en la calidad del sueño de un grupo muestral y ver si este es estadísticamente significativo.

Antecedentes

La estimulación cerebral por pulsos binaurales ha sido un tema disruptivo en las últimas décadas por los hallazgos de como a través de procesos de sincronización el cerebro llega a estados cognitivos o de humor solo con escuchar pulsos de sonido que presentan distintas frecuencias para cada oído como lo plantea la investigación en [1]. Sumado a esto la evolución tecnológica ha permitido monitorear en tiempo real la reacción que el cerebro está teniendo a estos estímulos a través de interfaces de cerebro computador podemos entonces tener una idea más cercana de como este proceso de sincronización sucede y las mejoras que se pueden realizar a los métodos. Estas investigaciones sobre inducción de estados cognitivos han ido desde mejorar los procesos de creatividad y consolidación de memoria como en [2] hasta inducir estados de vigilancia como en [3].

En años anteriores se ha realizado un esfuerzo de investigación en la Universidad del Valle de Guatemala relacionado a las señales bioeléctricas asociadas a distintos estados neurológicos y como estas explican su comportamiento y calidad. En 2018 se realizan los primeros estudios [4] y [5], donde se buscan desarrollar sistemas en donde primero se recolectan las señales producidas por el cerebro a través del procedimiento médico de colección de señales bioeléctricas llamado encefalograma. A través de estas señales se deseaba retro-alimentar al cerebro del sujeto de estudio para mejorar su respuesta a ciertos estados neurológicos como el estrés o cuando existe una necesidad de atención profunda.

En 2019 se continúan las investigaciones sobre como mejorar los procesos neuronales en [6], esta vez ya se enfocan específicamente en el estudio del sueño y se realiza análisis exploratorios de como combatir los problemas de sueño en atletas, estudio totalmente justificado en la dolencia que sufren para poder conciliar el sueño y esto provocando un déficit en su desempeño profesional. Las investigaciones empiezan a tomar un sendero relacionado a lo antes mencionado usando técnicas de neuro-retroalimentación con pulsos binaurales para poder centrar la frecuencia de operación de ciertas ondas cerebrales asociadas al sueño. Para esta parte del proyecto se empezaron a diseñar distintas partes del proyecto como lo son la interpretación de ondas cerebrales con algoritmos de clasificación de aprendizaje automático así como un dispositivo que pueda emitir estos pulsos que en aquel entonces fueron probados desde la computadora.

Para el año de 2020 se unen dos estudiantes más al proyecto y dividen el trabajo en dos, la parte lógica o *software* para el análisis de las señales encefalográficas, recolectada a través de dispositivos especializados y una parte de *hardware* encargada de emitir los pulsos binaurales que serán dirigidos para el paciente en prueba. En [7] y [8] podemos notar que son trabajos complementarios lo que abre espacio a esta investigación para un proyecto integrador y además de estudio de sus efectos.

El trabajo de las fases anteriores concluye con avances importantes pero dejando aún incógnitas como un estudio cuantitativo o estadístico que valide la eficacia de los pulsos binaurales. Aún no se determina cuales son las mejores frecuencias para las distintas fases de sueño, seleccionar el mejor algoritmo clasificador según las necesidades y por último y más importante realizar una integración del generador de pulsos binaurales con el módulo clasificador.

Justificación

La deficiencia crónica de sueño, definida como el estado inadecuado o mínimo de sueño, es un factor determinante y infravalorado en lo que concierne al estado de salud según [9]. La privación de sueño contribuye en una gran parte al desarrollo de trastornos a niveles moleculares, inmunes y neurológicos, todos estos factores antes mencionados sirve para el desarrollo y exacerbación de enfermedades cardíacas y del metabolismo por lo tanto reduciendo la calidad de vida y la longitud de esta. He aquí una de las motivaciones fundamentales que conducen esta investigación, ya que con el sistema a desarrollar se estaría mejorando la calidad de sueño y por lo tanto de vida de las personas con trastornos de sueño.

En fases anteriores se realizaron importantes avances en esta línea de investigación, desarrollando los módulos que conforman a este sistema de estimulación por pulsos binaurales como lo son el generador de pulsos [8] y el clasificador con aprendizaje automático [7] por separado. Es entonces tarea de esta investigación completar el sistema realizando un trabajo integrador de módulos y validarlo a través de pruebas estadísticas.

Motivado por la integración final de este sistema, es de suma importancia evaluar el trabajo de los clasificadores estudiados en [7] y de otros algoritmos no estudiados para escoger el que presente el mejor desempeño. Esta evaluación se realizará no solo a través de datos para testear sino también comparar con estándares médicos sobre la clasificación que sugieren para los datos colectados.

En el estudio del generador de pulsos binaurales [8] se realizó el prototipo del módulo generador de pulsos binaurales mas no se definen frecuencias específicas para inducir las fases de sueño en el orden correcto. A través de investigación y pruebas se realizarán recomendaciones acompañadas de una opinión médica profesional para luego evaluar con estudios cuantitativos si existe un impacto significativo en la calidad de sueño.

Objetivos

Objetivo General

Integrar el módulo de reconocimiento de patrones de señales biomédicas con el módulo de generación de pulsos binaurales, desarrollados en fases previas, y realizar un estudio del impacto del sistema en la calidad del sueño de las personas.

Objetivos Específicos

- Realizar un trabajo de integración del módulo de reconocimiento de patrones de señales biomédicas relacionadas a las etapas de sueño con el módulo de implementación de un sistema generador de pulsos binaurales para el estudio del impacto de los pulsos en la calidad de sueño propios de la fase anterior del proyecto.
- Mejorar los clasificadores de etapas de sueño basados en algoritmos de aprendizaje automático desarrollados en fases previas del proyecto, y validar los resultados mediante asesoría médica y comparación con estudios similares.
- Definir perfiles de individuos a estudiar y obtener señales bioeléctricas utilizadas en el análisis de etapas de sueño en una clínica.
- Realizar un análisis estadístico para determinar si hay un impacto significativo de los pulsos binaurales en las señales bioeléctricas asociadas a las etapas de sueño.

Marco teórico

Señales Electroencefalográficas (EEG)

El método de comunicación de nuestro cerebro es químico pero también eléctrico, lo cuál genera una gran ventaja debido a que esta actividad puede ser monitorizada desde métodos no invasivos tomando la información a través de electrodos que registren la actividad eléctrica y a través de distintos canales poder asociar las frecuencias de cada onda a estados del cerebro humano y las actividades relacionadas a este estado. Esta frecuencia de las ondas es el principal indicador del estado mental y se mide en Hercios (Hz) o ciclos por segundo con variaciones desde 0.5 hasta 38 Hz y una amplitud asociada a la intensidad de la onda. El procedimiento para la medición de estas ondas es denominada encefalograma o por sus siglas ECG [10].

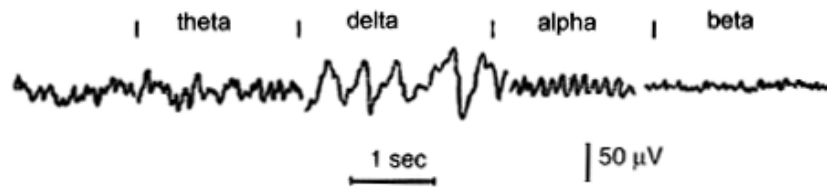


Figura 1: Actividad eléctrica cerebral [11].

Las ondas cerebrales se clasifican según los rangos de frecuencia donde se encuentran contenidas y las cuatro categorías son: Beta, Alfa, Theta y Delta.

- Ondas Beta: Estas se encuentran contenidas entre los 14 a 30 Hz, comúnmente se asocian a estados con una alta actividad mental en situaciones como estudio, resolución de problemas, ataques de ansiedad o concentración plena. Se asocia a una actividad intensa del cerebro donde se encuentra despierto, con extroversión y una alta percepción por parte de los sentidos [10].
- Ondas Alfa: Se encuentran entre los 8 a 13.9 Hz, se pueden encontrar en momentos antes de dormir, relajación mental y no actividad. Presentan una mayor amplitud [10].
- Ondas Theta: Una mayor amplitud en relación a las alfa, estas se encuentran entre los 4 a 7.9 Hz y están asociadas con un estado de sueño, meditación profunda, con actividades creativas y que requieren inspiración [10].
- Ondas Delta: Son las ondas más lentas y además con mayor amplitud de todas, en estas se encuentran estados como el sueño profundo o una concentración plena en donde se requiere de una operación integral del cerebro [10].

Variables utilizadas en la clasificación de actividad de señales electroencefalográficas (EEG)

Frecuencia

Frecuencia se refiere a la tasa de repetición de un ciclo por unidad de tiempo, como antes se menciona para las señales electroencefalográficas se presentan distintas señales con distintos comportamientos, entre ellos podemos listar [11] :

- Rítmico: Actividad electroencefalográfica con señales de frecuencia constante [11].
- Arrítmico. Señales electroencefalográficas donde no hay un ritmo constante (frecuencia) [11].
- Disrítmico. Ritmos especiales no presentes en sujetos normales sino en pacientes con algún tipo de trastorno presente [11].

Amplitud

Amplitud, medido en voltios, es la cantidad de actividad eléctrica presente en una onda, esto puede depender de la técnica de medición [11].

- Atenuación (también supresión o depresión). es la reducción de la actividad eléctrica, cuando esta es disminuida a través de un estímulo se le llama señal bloqueada o que presenta un bloqueo [11].
- Hiper sincrnia. Es cuando se presenta un aumento en la actividad eléctrica o en el ritmo, entre las señales alpha, beta, o theta. El fenómeno se asocia a la cantidad de neuronas participando en la tarea [11].
- Paroxístico Actividad en donde se alcanza una alta amplitud en un corto período de tiempo para luego caer en una depresión abrupta a niveles normales. No necesariamente debe de ser una anomalía pero la mayoría de anomalías si las presenta [11].

Morfología

Refiere a la forma de la señal u onda. La forma de la señal está determinada por la frecuencia y el voltaje en conjunto. Los patrones se pueden definir como los siguientes [11] :

- Monomórfica. Patrón dominado por una actividad en específico [11].
- Polimórfica. Composición de varias formas para formar un patrón complejo constante [11].
- Sinusoidal. Con forma de función matemática seno. La actividad monomórfica es usualmente sinusoidal [11].

- Trásiente. Patrón aislado y completamente diferente a la actividad anterior [11].
 - Spike: Subida abrupta de amplitud que dura entre 20 hasta 70 msec [11].
 - Sharp wave: Subida abrupta de larga duración entre 70 hasta 200 msec [11].

Sincronía

Sincronía se refiere a la aparición simultanea y rítmica de varios patrones sobre distintas regiones, para este caso de las ondas cerebrales en distintas regiones siendo estas unilaterales o bilaterales [11].

Periodicidad

Periodicidad se refiere a la distribución de elementos de un patrón en una unidad de tiempo y si este se repite o es actividad inusual [11].

Obtención de señales electroencefalográficas (EEG)

Electrodos

Pequeños discos de un material metálico, usualmente acero inoxidable como se observan en la Figura 2 pero también se pueden encontrar de oro, plata o estaño. Los electrodos usualmente se cubren con materiales como polímeros o recubrimientos de gel, cada uno de estos se encuentra en una posición definida que se estandariza en el sistema internacional 10/20. Se utilizan las letras y números para etiquetar áreas del cerebro. El sistema 10/20 establece que la letra F se utiliza para reconocer el lóbulo frontal y la letra T para el lóbulo temporal, los números para denotar el lado del cráneo, es decir los números pares son para el lado derecho del cráneo y los números impares para el lado izquierdo.



Figura 2: Electrodos de acero inoxidable [11].

Electro Cap

El *Electro Cap* (Gorro de electrodos en español) es una técnica utilizada para realizar electroencefalogramas con una mayor densidad de señales puesto que se colocan más electrodos ordenados según el sistema 10/20 y obteniendo un bus de salida para analizar las señales [11].



Figura 3: Electro - Cap [11].

Electro Gel

Utilizado como una extensión maleable de los electrodos, esto ayuda a maximizar el contacto con la piel y a tener una menor resistencia en la lectura de las señales mejorando así la calidad de la medición [11].



Figura 4: Electro - Gel [11].

Impedancia

La impedancia es la medida de oposición a la corriente que pasa a través de un elemento a una frecuencia determinada, esta se mide en Ohms. A medida que la impedancia aumenta, esta presenta mayor resistencia a un flujo de corriente. Para el estudio de las señales biomédicas se desea una impedancia baja en los electrodos para que no exista una atenuación en la amplitud de las señales obtenidas y por ende estas sean de mejor calidad [11].

Posicionamiento de electrodos (Sistema 10/20)

El sistema se basa en dividir el cráneo medido desde la región *Nasion* que es el punto de intersección del hueso frontal y de dos huesos nasales llegando hasta la región *Inión* la cual es la proyección más prominente del hueso occipital en la parte posterioinferior del cráneo. A estas divisiones de los porcentajes se les asigna un nombre y un código empezando por el Polo Frontal (Fp), Central (C), Parietal (P), Occipital (O) y Temporal (T). Los electrodos ubicados en el centro del cráneo se les da la letra Z (Por el número cero, en inglés *Zero*). A los puntos en el hemisferio derecho se les asignan números pares y a los puntos del hemisferio izquierdo se les asignan números impares [11].

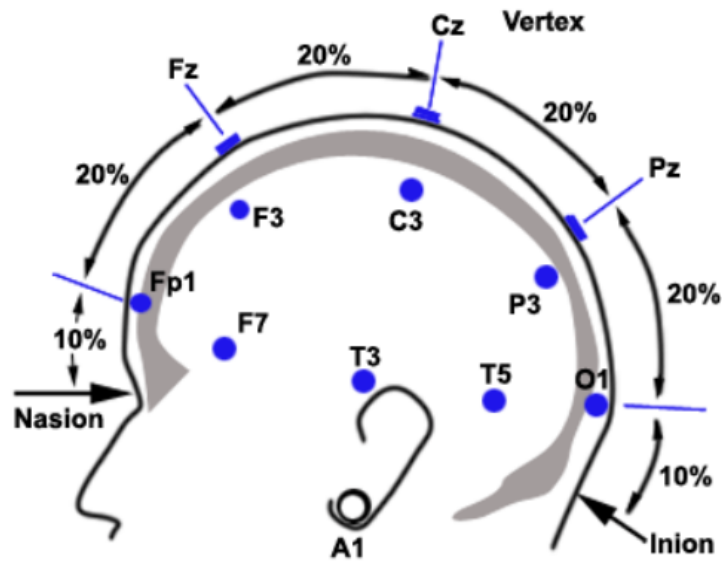


Figura 5: Sistema de posicionamiento 10/20 [11].

Open BCI

BCI por sus siglas en inglés *Brain Computer Interface* o Interfaz de cerebro computador, es un término acuñado en el estudio de señales electroencefalográficas y su aplicación en distintas ramas. Open BCI entonces es una plataforma de fuente libre la cuál se dedica a diseñar *Software* y *Hardware* especializado para tomar mediciones a señales biomédicas y luego visualizarlas en la computadora o utilizarlas para posterior control en aplicaciones embebidas, posee una gama de productos variada pero se han centrado en desarrollar tarjetas con circuitos embebidos especializados en procesamiento de señales bioeléctricas con amplificadores (puesto que estas señales son de baja amplitud) [12].

Cython Board

La *Cython Board* es una tarjeta con un microcontrolador compatible con la suite de Arduino, posee 8 canales de recepción de señales con procesador de arquitectura de 32 bits implementando un PIC32MX250F128B dando una apertura al procesamiento rápido de 250 Hz, una memoria local que satisface las necesidades y que además ya viene pre-instalado el *bootloader* con la última versión del *software* que esta organización ofrece. Con esta tarjeta podemos monitorear actividades electroencefalográficas, musculares y cardíacas, posee una comunicación inalámbrica gracias a su integración con un dispositivo *USB* llamado *Dongle* que implementa comunicación por radiofrecuencia. Además de ser compatible con el protocolo *Bluetooth Low Energy* o BLE abriendo la posibilidad de comunicación con cualquier otro dispositivo que tenga habilitado este tipo de comunicación [12].

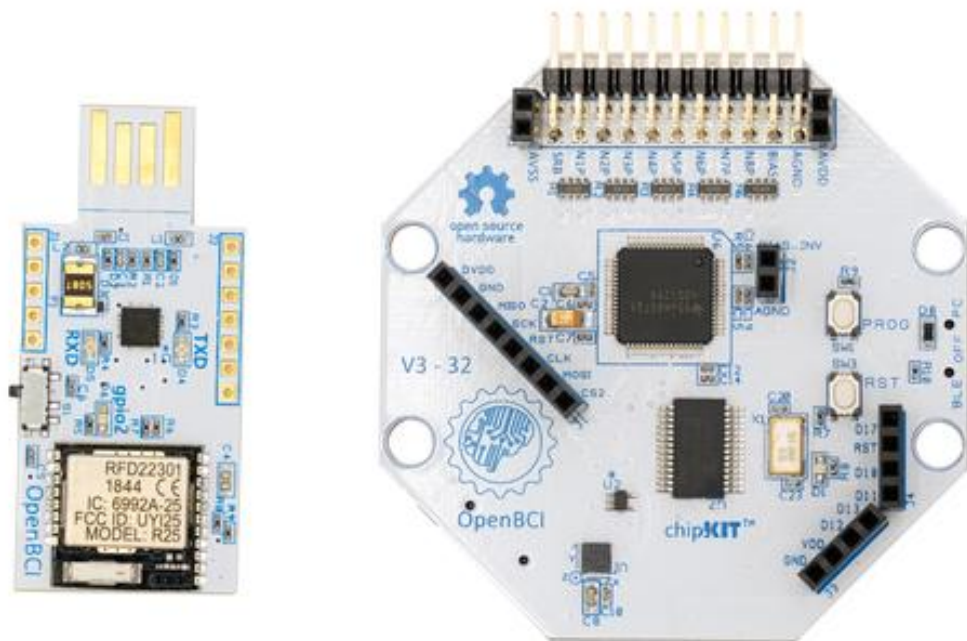
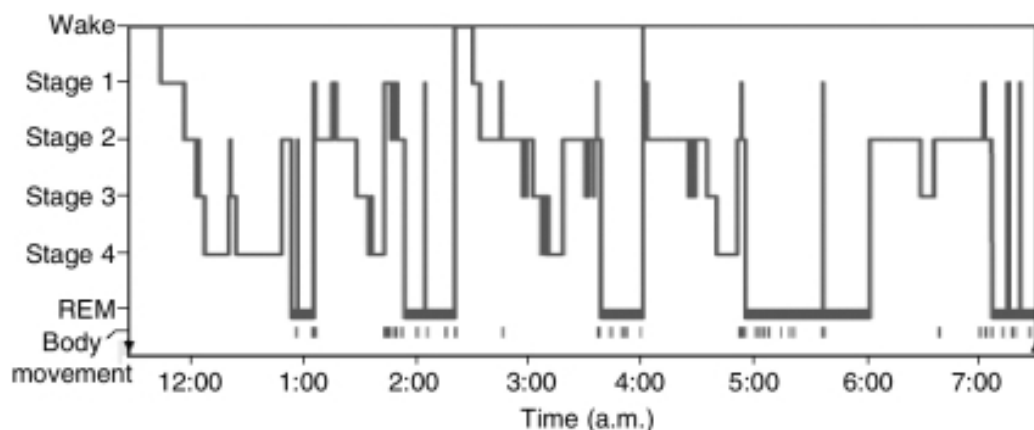


Figura 6: Cython Board y USB Dongle [12].

Arquitectura de las etapas del sueño

Arquitectura del sueño se refiere a la organización estructural básica de un sueño normal. Hay dos tipos de sueño, NREM por sus siglas en inglés (*Non-Rapid Eye Movement*), y REM por sus siglas en inglés (*Rapid Eye Movement*) la cual se divide en 4 etapas. Cada una de estas presenta patrones característicos en las ondas cerebrales, movimiento de los ojos, actividad muscular, etc.

Conforme va evolucionando el período de sueño, las etapas NREM y REM se alternan de forma cíclica, el motivo de esto aún no está bien explicado pero se cree que la intercalación irregular de estas etapas está asociado a desordenes de sueño. Como ejemplo podemos mencionar que una persona con narcolepsia en lugar de entrar en la etapa NREM como es usual, entran en una etapa REM [13].



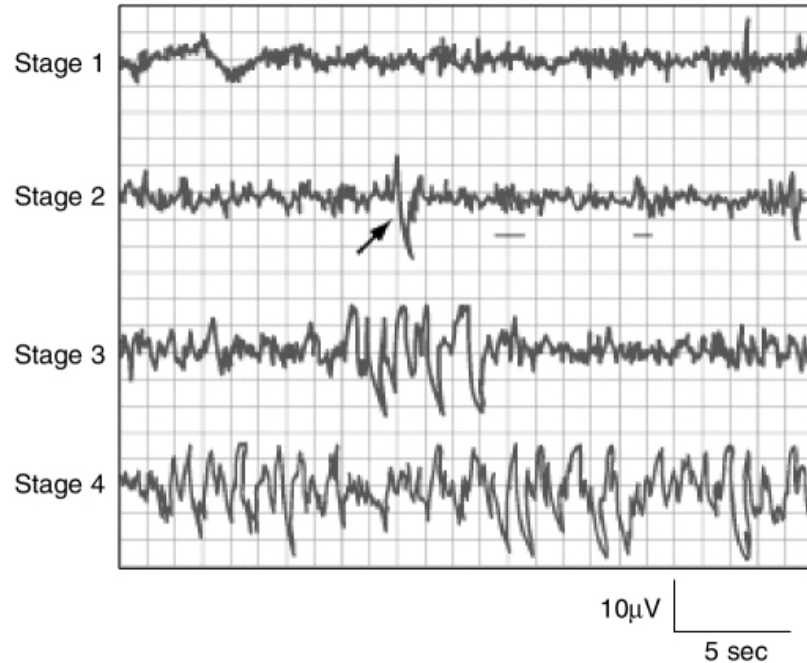


Figura 8: Etapas de NREM [13]

Etapas 1

La etapa 1 de la fase NREM juega un papel fundamental puesto que es la transición hacia dormir, sin contar a aquellas personas que presentan desordenes de sueño y recién nacidos, esta etapa es la primera etapa de todo el ciclo de sueño y dura de 1 a 7 minutos aproximadamente. Esta etapa es fácilmente interrumpida por ruidos fuertes y dado su naturaleza transitoria nos puede llevar a estar despiertos, la actividad cerebral en esta etapa 1 comienza en patrones que marcan la vigilia como lo son las ondas alfa con patrones rítmicos llegando a amplitudes bajas con frecuencias mezcladas. Las ondas alfa asociadas con el estado de una vigilia en relajación están caracterizadas por frecuencias de 8 a 13 ciclos por segundo (Hz) [13].

Etapas 2

Esta etapa dura aproximadamente de 10 a 25 minutos en su ciclo inicial y se va expandiendo con cada ciclo exitoso de sueño, eventualmente va a constituir de 45 a 55 por ciento del total del tiempo en el episodio de sueño completo. En esta etapa despertar es más difícil y se requieren estímulos más fuertes que en la etapa 1. La actividad de esta etapa muestra amplitudes bajas, frecuencias mezcladas caracterizadas por la aparición de husos, se considera que esta parte es importante para la consolidación de la memoria. Las personas que durante su día tuvieron la oportunidad de aprender una nueva tarea o habilidad tienden a presentar una mayor densidad de husos en los patrones de esta etapa. [13]

Etapa 3 y 4

La etapa 3 y 4 se tienden a agrupar en un estado denominado SWS por sus siglas en inglés *Slow-Wave Sleep* o sueño de ondas lentas, la mayoría de veces esta se presenta durante el primer tercio del episodio de sueño. Ambas etapas tienen patrones que les caracterizan, la etapa 3 dura solo unos minutos y constituye de 3 a 8 por ciento de todo el sueño, en esta etapa se presenta un incremento en la amplitud de las ondas y se presenta SWS.

La última etapa de la fase NREM, la etapa 4, se constituye de un tiempo de 20 a 40 minutos en el primer ciclo y representa un 10 a 15 por ciento de todo el episodio de sueño, es la etapa en donde se presenta una mayor actividad en la amplitud de las ondas SWS [13].

Sueño REM

El sueño REM es definido por la presencia de ondas cerebrales de-sincronizadas con una amplitud baja y frecuencias mezcladas, movimientos rápidos de los ojos, presencia de patrones “Diente de Sierra”, una actividad fuerte en las ondas teta (3 a 7 Hz) además de una actividad lenta de ondas alfa que caracterizan al sueño REM.

Hay diferencias fisiológicas importantes entre las etapas REM y NREM y una de ellas es que durante el sueño REM se desactiva el movimiento del cuerpo (Atonía muscular) debido a que se asocia la fase REM con los sueños y para evitar que un individuo se mueva durante un sueño o pesadilla. Aproximadamente el 80 por ciento de los sueños vívidos resultan durante esta etapa del sueño, además la consolidación de la memoria se asocia durante el sueño REM [13].

Proceso fisiológico	NREM	REM
Actividad Cerebral	Disminuye respecto a la vigilia	Aumenta respecto a vigilia
Pulso del Corazón	Realentiza respecto a la vigilia	Aumenta respecto NREM
Presión Sanguínea	Disminuye respecto a la vigilia	Aumenta respecto a NREM
Actividad del Nervio Simpático	Disminuye respecto a la vigilia	Aumenta respecto a vigilia
Tono muscular	Similar a la vigilia	Ausencia
Flujo sanguíneo al cerebro	Disminuye respecto a la vigilia	Aumenta respecto NREM
Respiración	Disminuye respecto a la vigilia	Aumenta respecto NREM
Airway resistance	Aumenta respecto a la vigilia	Aumenta respecto a la vigilia
Temperatura corporal	Menor que a la vigilia	No regulada,
Excitación sexual	No ocurre con frecuencia	Mayor que en NREM

Cuadro 1: Diferencias fisiológicas NREM-REM [13].

Aprendizaje automático

El paradigma original del método científico plantea que si se introduce datos y reglas este dará como salida una respuesta esperada, esto según la evolución de la tecnología ha sido desafiado por el paradigma de la inteligencia artificial el cuál plantea que si introducimos datos y respuestas podamos entender las reglas del comportamiento de un fenómeno, es así como las ramas de la inteligencia como el aprendizaje automático, mejor conocido como *Machine Learning* es usado para enseñarle a máquinas (computadores) como manejar los datos de una forma más eficiente. Muchas veces los patrones contenidos en los datos no son observables desde un solo punto de vista, es por ello que aplicamos aprendizaje automático para observar la “foto completa”. Dentro de este campo del *Machine Learning* encontramos varias divisiones, para delimitar las que son importantes para esta investigación se consideran tres de las más grandes, aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y redes neuronales. Estos algoritmos se han organizado según su taxonomía [14].

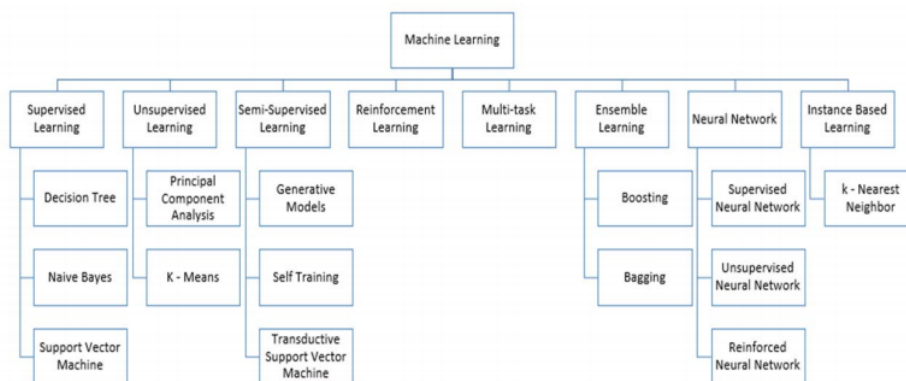


Figura 9: Aprendizaje de máquinas [15].

Aprendizaje supervisado

La principal característica de este tipo de algoritmos es que este genera una función de salida que mapea las entradas en salidas deseadas. El principal problema que se formula en los algoritmos no supervisados es el de clasificación, la unidad de aprendizaje tiene como meta aprender a mapear una función que mapea información sobre una entrada hacia una categoría [15].

Se le llama supervisado porque usualmente esta función de mapeo a clasificaciones implementa categorías que se han determinado por el diseñador del algoritmo, es importante resaltar que cuando se diseñan este tipo de algoritmos tiene que ser fácil determinar las categorías dentro de los datos que obtenemos para realizar predicciones y mapear de forma correcta. Entre los principales algoritmos presentes en el aprendizaje supervisado tenemos las redes neuronales y los árboles de decisiones, podemos notar que en este tipo de algoritmos dependemos de forma completa de las entradas y de las categorías previamente diseñadas

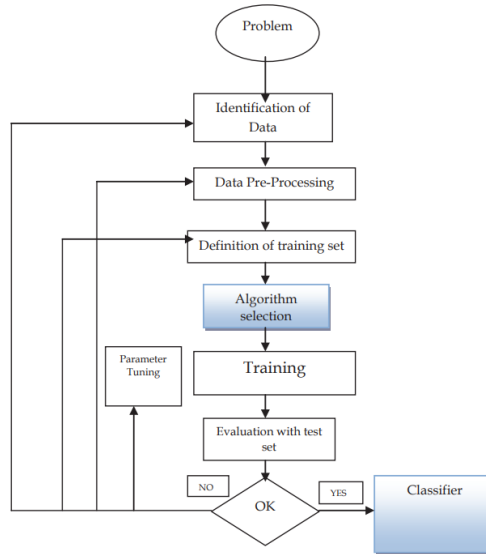


Figura 10: Aprendizaje supervisado de máquina [15]

Aprendizaje no supervisado

Como su nombre lo sugiere, en este tipo de algoritmos se pretende que la computadora aprenda a realizar algo que no se le indica explícitamente, retomando el ejemplo de los clasificadores uno de los principales problemas en los cuáles se enfoca el *Machine Learning*, a los algoritmos de aprendizaje no se le va a dotar de categorías ya establecidas, en cambio se le va a indicar éxito con un sistema de recompensa haciendo referencia al mundo real donde de igual forma se recompensa el trabajo bien hecho o se penaliza el trabajo que no obtuvo los resultados esperados [15].

Uno de los principales algoritmos es el denominado *Clustering*, este algoritmo trata de buscar similitudes en los datos de entrenamiento del modelo. El presunto es que estos *clusters* o agrupaciones descubiertas van a coincidir con clasificaciones intuitivas sin embargo este no nos va a devolver nombres para las categorías, es aquí donde el diseñador examina los resultados y analiza si satisface sus necesidades. Es importante hacer mención que para utilizar este tipo de algoritmos se requiere la cantidad de datos para que nos de resultados fidedignos [15].

Aprendizaje por redes neuronales

El aprendizaje por redes neuronales (Comúnmente llamadas redes neuronales artificiales o ANN por sus siglas en inglés *artificial neural networks*) se deriva del concepto biológico de las neuronas. Una neurona es una estructura que funciona como celda en el cerebro, para entender como funciona una red primero debemos entender como funciona su unidad básica. Las neuronas tienen cuatro partes básicas que se pueden apreciar en la siguiente Figura 11 [15].

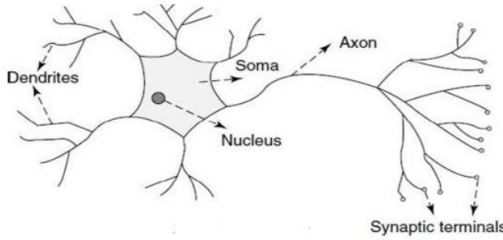


Figura 11: Neurona [15].

Las dendritas (*Dendrites*) reciben el impulso eléctrico, el soma lo procesa y la salida es guiada por el axón hacia la dendrita de otra neurona, la interconexión de varias neuronas es llamada red neuronal.

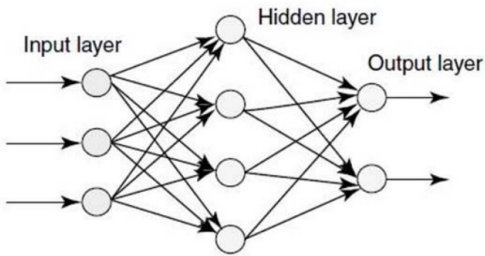


Figura 12: Red neuronal artificial [15].

Una red neuronal artificial se comporta de la misma forma. Existen tres tipos de capas, las de entrada (similares a las dendritas), las capas ocultas (similares al soma y el axón) y la capa de salida (similar a las terminales de las dendritas). Cada una de estas neuronas tiene una función que dependiendo de la entrada se activará o no y pasará esta información a la siguiente capa como se puede observar en la figura 12.

Principales clasificadores de *Machine Learning* según tipo de aprendizaje

- Supervisados según [14]
 - Árbol de decisiones
 - *Naïve Bayes*
 - Máquina de vector de soporte
- No supervisados según [14]
 - *K-Means Clusters*
 - Análisis de componente principal
- Redes neuronales artificiales según [14]
 - Redes supervisadas
 - Redes no supervisadas
 - Redes neuronales reforzadas

Pulsos Binaurales

Los pulsos binaurales han sido utilizados en investigaciones [2] buscando mejorar diversos procesos cognitivos como la creatividad, concentración y también para mejorar la calidad de sueño, en algunos sitios de internet [2] se le ha llamado una “droga digital” bajo el supuesto que induce un estado cognitivo y de humor especial activando patrones en el cerebro. Un pulso binaural es una ilusión auditiva que se activa cuando dos tonos a distintas frecuencias son presentados en los oídos, por ejemplo exponer un oído a un tono de 250 Hz y el otro a 260 Hz, por resultado obtenemos que el cerebro solo percibe un pulso binaural de 10 Hz que fluctua de oído a oído en lugar de dos a frecuencias más alta.

La forma exacta en la que el cerebro percibe estos pulsos aún está indefinido pero parece que el sistema reticular de activación y el *colliculus* inferior juegan un rol principal [1]. En animales, el estímulo producido por pulsos binaurales ha mostrado una producción de patrones neuronales en ciertas frecuencias o una sincronización la frecuencia diferenciada que percibe el cerebro. Cabe mencionar que las frecuencias que pueden presentar interacción e inducir sincronización con estos pulsos son solo aquellas que son detectables al oído del individuo y que también se presenten en sus ondas electroencefalográficas, se ha demostrado que en los humanos esta interacción ha inducido estados cognitivos y de ánimo [3].

Si los pulsos binaurales tienen un efecto sobre los procesos cognitivos a través de una sincronización neuronal, es entonces importante considerar que dependiendo de la frecuencia a la que se exponga tendrá efecto en distintos patrones neuronales y por consiguiente en estados cognitivos. Por ejemplo, la comunicación de corto rango en las áreas del cerebro están asociadas a la sincronización con frecuencias gamma mientras que las comunicaciones de rango mayor están asociadas con frecuencias más lentas. Entonces tenemos “frecuencias mensajeras” para control cognitivo. Por ejemplo la sincronización en frecuencias gamma tienen un papel en el control de la consolidación de memoria y que es utilizada para personas que desear estudiar y obtener una mejor retención. Otro ejemplo interesante es la sincronización en las frecuencias de la banda alfa la cual presenta una excitación cortical produciendo estados de cognición que aumentan el rendimiento en tareas de pensamiento divergente, entonces podemos notar que en la banda alfa y gamma se mejora el rendimiento de tareas de creatividad [1].

Pruebas estadísticas

Los estudios estadísticos se pueden clasificar como experimentales u observacionales. En un estudio experimental se realiza un procedimiento o experimento para generar datos, desde aquí definimos la variable de interés y luego se definen las variables que pueden ser de interés con nuestro objetivo y como influyen sobre la variable de interés. En cambio en un estudio observacional los datos se obtienen a través de encuestas por muestreo y no por un procedimiento controlado y aunque siempre se consideran las mejores prácticas para realizar este análisis en este tipo de investigación no es posible el control riguroso que se tiene en un estudio experimental que se diseña desde cero [16].

Para esta investigación se consideran tres tipos de diseños de experimentos: diseño completamente aleatorizado, diseño de bloques aleatorizado y experimento factorial. Para cada

uno de ellos se precisa la herramienta estadística conocida como análisis de varianza (ANOVA, por su acrónimo en inglés) y con ella analizar los datos disponibles, cabe mencionar que esta herramienta estadística también se puede utilizar con datos obtenidos a partir de un estudio observacional. Por ejemplo, se verá que en un diseño de experimentos completamente aleatorizado este procedimiento también sirve para probar la igualdad de tres o más medias poblacionales cuando se obtienen los datos mediante un estudio observacional [16].

Para los análisis de varianza en donde deseamos comparar si la media de una población es igual a la de otra tenemos una premisa principal y se refleja en el planteamiento de una hipótesis nula y una hipótesis alternativa de la siguiente forma:

$$H_o : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_k$$

$$H_a : \text{no todas las medias poblacionales son iguales}$$

Donde k es el número de poblaciones presentes en el estudio y μ su media poblacional

El criterio de rechazo es si se obtiene un valor-p menor que el nivel de significancia (usualmente de 0.05) [16].

Existen supuestos requeridos que debemos de considerar para que las pruebas de varianza puedan aplicar en un experimento:

- En cada población, la variable de respuesta está normalmente distribuida
- La varianza de la variable de respuesta, denotada como σ^2 , es la misma en todas las poblaciones
- Las observaciones deben ser independientes

Diseño completamente aleatorizado

En este tipo de experimento se seleccionan los niveles de un factor como variable a las cuáles les vamos a llamar tratamientos y a cada una de las veces que ese experimento con los distintos niveles de tratamientos fue realizado le llamaremos replicación, cabe mencionar que la asignación de tratamientos es de forma aleatoria para cada unidad experimental. Este método nos ofrece ventajas como la flexibilidad de poder seleccionar la cantidad de tratamientos y replicas siempre y cuando cumplamos con una cota mínima para que el experimento sea significativo además que a través del análisis de varianza podemos obtener de una forma rápida y precisa los resultados del experimento [16].

Diseño de bloques aleatorizado

Este experimento es construido a partir de un diseño completamente aleatorizado pero esta vez se toma en consideración el error que puede inducir el orden de corrida del experimento así como también el error que inducen en las replicas asociado a la singularidad

de cada individuo, es un experimento más robusto puesto que al error se le extrajo los valores de los bloques (filas de datos o replicaciones) [16].

Experimento multifactorial

Los diseños antes mencionados solo permiten analizar y formular conclusiones estadísticas acerca de un factor. Sin embargo, existe la necesidad muchas veces de formular conclusiones acerca de más de una variable o factor, entonces el experimento factorial resuelve este problema siendo un diseño que permite obtener conclusiones simultáneas acerca de dos o más factores. Se utiliza el término factorial porque también se considera la interacción entre factores [16].

Metodología

En esta sección se pretende dar un resumen de las actividades críticas para poder satisfacer el objetivo general y los objetivos específicos planteados en esta investigación. Se encuentran divididas en cuatro grandes etapas, cada una de estas alineada con un objetivo específico.

Etapas de integración

En esta etapa se pretende realizar un levantamiento de las fases previas, realizar correcciones para luego integrar en un solo sistema funcional.

Revisión de literatura y tesis de fases previas

Revisión de tesis de fases previas, especialmente la fase anterior donde se desarrollaron los prototipos que se integraran como parte de esta investigación.

Realizar un levantamiento de los prototipos generados en fases previas

Utilizar la documentación pasada para poder realizar los experimentos planteados en las fases anteriores y poder tener un mejor conocimiento de como fueron contruidos, las siguientes tareas engloban los experimentos necesarios para poder levantar los módulos de clasificador de etapas de sueño y el generador de pulsos binaurales.

- Pulsos binaurales en PC
- Pulsos binaurales en *Raspberry Pi*
- Algoritmos clasificadores de *Machine Learning* en *Matlab*
- Base de datos obtenida de *Physionet*

Correcciones a fases previas y traslado a nuevas plataformas

Luego de tener los módulos listos realizar el levantamiento de fases previas plantear mejoras a la metodología de diseño anteriormente planteada.

Desarrollo de algoritmos de *Machine Learning* a Python en PC

Realizar un equivalente a los algoritmos clasificadores desarrollados con anterioridad en Matlab hacia el lenguaje de programación *Python*.

Desarrollo de algoritmos de *Machine Learning* a Python en Raspberry Pi

Realizar un traslado de los algoritmos clasificadores implementados en computadora a una Raspberry Pi y hacer pruebas de rendimiento.

Transmisión de datos de Python a PC

Desarrollar un método de recepción de datos del *Electro-Cap* hacia la computadora a través de la *Cython Board* y el *Dongle* y llevar a cabo los siguientes procedimientos:

- Estabilizar
- Estandarizar

Transmisión de datos de *Cython board* a Python en Raspberry Pi

Realizar pruebas de compatibilidad del método de recepción de datos del *Electro-Cap* hacia la *Raspberry Pi* a través de la *Cython Board* y el *Dongle* a través de las siguientes actividades:

- Investigación
- Instalación de *drivers*
- Interconexión
- Estabilizar
- Estandarizar

Modificación de función generadora de pulsos binaurales para recibir de entrada la fase de sueño

La función generadora de pulsos binaurales desarrollada en la fase previa recibe parámetros sobre el pulso binaural *per se* pero no hay un diccionario que mapea la fase de sueño hacia una configuración del pulso por lo que esto es crítico para el sistema y su funcionalidad.

Implementación de algoritmo clasificador con datos de transmisión en tiempo real de *Cython Board*

Para esta actividad se desea tener una revisión de la efectividad y precisión del algoritmo clasificador recomendado en la fase previa y como este reacciona a los cambios como la implementación en la *Raspberry Pi* y el algoritmo de recepción de datos.

Integración de módulo generador de pulsos binaurales con datos de transmisión en tiempo real de *Cython Board*

Esta actividad es probablemente una de las más críticas de la investigación puesto que es la integración final de las dos fases anteriores produciendo el sistema generador de pulsos que se alimenta de los datos del *Electro-Cap*

Etapas de mejora de algoritmos clasificadores

Realizar pruebas en *Python* con clasificadores no utilizados anteriormente

Una vez finalizado el prototipo final del sistema generador de pulsos con clasificador de etapas de sueño, realizar pruebas a algoritmos asociados a la investigación con señales bioeléctricas es una actividad crítica para mejorar la precisión del sistema antes de hacer pruebas en individuos.

- LSTM por sus siglas en inglés *Long short-term memory* (Memoria de corto y largo plazo)
- *K Means Clusters*

Realizar pruebas con librerías de *Python* para la generación de pulsos binaurales

Evaluar la posibilidad de utilizar una pista de fondo para volver más amigable el sonido que lleva los pulsos binaurales, utilizar la idea un sonido *carrier* para los pulsos binaurales.

Etapas de diseño de experimento estadístico y recolección de datos

La validación es fundamental para esta investigación y el vehículo para lograr son los experimentos estadísticos que podamos realizar a partir de toda la información recolectada de las personas que estarán participando por lo que este factor humano es un eje transversal en el proyecto y debemos de tener las debidas consideraciones.

Selección de características de individuos a estudiar y selección del tamaño de muestra

Debido a que contamos con recursos limitados especialmente de movilidad por la pandemia del COVID-19 que se está desarrollando durante el período de ejecución de esta investigación se debe de tomar en cuenta la logística para recolección de datos. La selección de variables a considerar para las personas que participan en el proyecto es importante para delimitar el alcance y por lo tanto escoger un tamaño adecuado de muestra.

Preparación de consentimiento informado y convocatoria

Debido a que existe un trabajo que involucra la participación de personas es importante redactar un documento privado y presentarlo al comité de ética de la Universidad del Valle. En este documento se deben de establecer los reglamentos que garanticen la seguridad de los datos personales de los participantes de la investigación y lanzar una convocatoria para las personas que participarán en la investigación.

Calendarizar y ejecutar recolección de datos

Debido a la existencia de un único kit completo para realizar la experimentación se debe de calendarizar la recolección de datos por persona y llevar un control riguroso del tiempo puesto que cada medición toma una noche de sueño.

Etapas de ejecución de experimentos estadísticos

Una vez que se tengan los resultados de cada uno de los individuos participantes de la recolección de datos crudos podemos entonces realizar una encuesta además para alimentar el modelo estadístico diseñado con anterioridad y ejecutar los análisis pertinentes.

Investigación de algoritmos de análisis estadístico en lenguaje de programación R

El lenguaje de programación R es un lenguaje interpretado especializado en análisis y pruebas estadísticas por lo que existen algoritmos que simplifican la tarea de ejecutar los experimentos diseñados con anterioridad.

Validación estadística de supuestos y pruebas de normalidad

Debido a que desconocemos la forma en la que se comporta la distribución de información que será obtenida es necesario analizar si la distribución obtenida cumple con los supuestos para dar validez a los modelos estadísticos.

Análisis de varianzas

Por último ejecutar los experimentos con el lenguaje de programación R y realizar las debidas conclusiones.

Cronograma de actividades

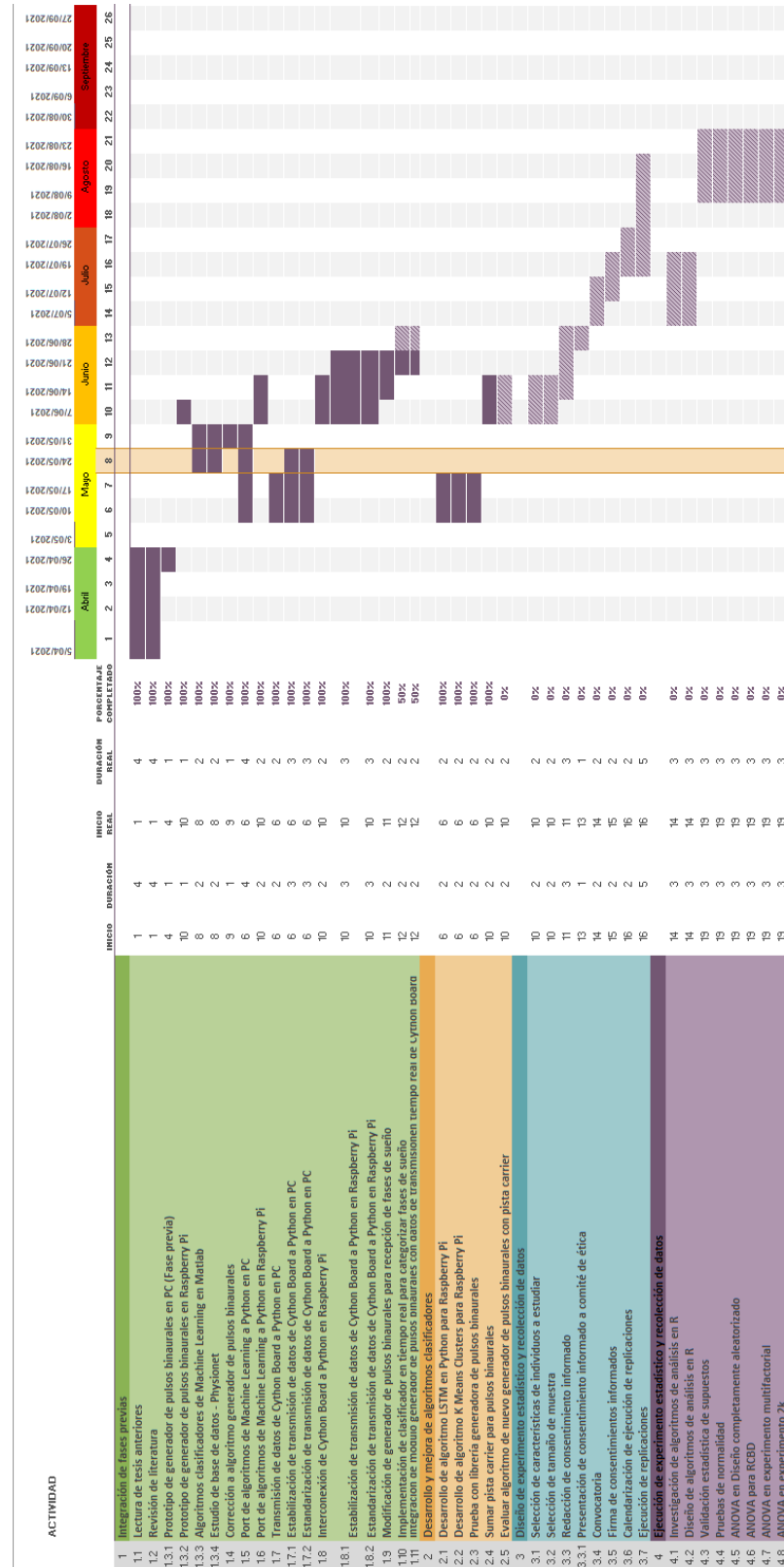


Figura 13: Actividades del cronograma

Índice preliminar

- Prefacio
- Índice
- Lista de figuras
- Lista de cuadros
- Resumen
- Abstract
- Introducción
- Antecedentes
- Justificación
- Objetivos
 - Objetivo General
 - Objetivos Específicos
- Alcance
- Marco teórico
 - Señales Electroencefalográficas
 - Variables utilizadas en la clasificación de actividad de señales electroencefalográficas (EEG)
 - Frecuencia
 - Frecuencia
 - Amplitud
 - Morfología
 - Sincronía
 - Periodicidad
 - Obtención de señales electroencefalográficas (EEG)
 - ◇ Electrodo
 - ◇ Electro Cap
 - ◇ Electro Gel
 - ◇ Impedancia
 - ◇ Posicionamiento de electrodos (Sistema 10/20)
 - Open BCI
 - ◇ Cython Board
 - Arquitectura de las etapas del sueño
 - ◇ Ciclos de sueño para NREM y REM

- ◊ Las cuatro etapas del NREM
 - ◊ Etapa 1
 - ◊ Etapa 2
 - ◊ Etapa 3 y 4
 - ◊ Sueño REM
 - ◊
- Aprendizaje automático
 - ◊ Aprendizaje supervisado
 - ◊ Aprendizaje no supervisado
 - ◊ Aprendizaje por redes neuronales
 - ◊ Principales clasificadores de Machine Learning según tipo de aprendizaj
- Pulsos Binaurales
- Pruebas estadísticas
 - ◊ Diseño completamente aleatorizado
 - ◊ Diseño de bloques aleatorizado
 - ◊ Experimento multifactorial
- Integración de fases previas
- Desarrollo y mejora de algoritmos clasificadores
- Diseño de experimento estadístico y recolección de datos
- Resultados de experimento estadístico y estadísticos inferenciales
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos
- Glosario

Referencias

- [1] S. Kuwada, T. C. Yin y R. E. Wickesberg, “Response of cat inferior colliculus neurons to binaural beat stimuli: possible mechanisms for sound localization,” *Science*, vol. 206, n.º 4418, págs. 586-588, 1979.
- [2] S. A. Reedijk, A. Bolders y B. Hommel, “The impact of binaural beats on creativity,” *Frontiers in human neuroscience*, vol. 7, pág. 786, 2013.
- [3] J. D. Lane, S. J. Kasian, J. E. Owens y G. R. Marsh, “Binaural auditory beats affect vigilance performance and mood,” *Physiology & behavior*, vol. 63, n.º 2, págs. 249-252, 1998.
- [4] J. Aguirre, “Diseño, Análisis, y Desarrollo de un Sistema de Entrenamiento para Mejorar el Desempeño de los Atletas del Comité Olímpico Guatemalteco,” Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2018.

- [5] M. Godoy, "Sistema de Neurofeedback para mejorar el rendimiento de los Atletas del Comité Olímpico Guatemalteco. Diseño e implementación de módulo de recopilación de señales y módulo de retroalimentación," Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2018.
- [6] J. Muñoz, "Diseño de un sistema inteligente de monitoreo de ondas EEG y generador de pulsos binaurales para combatir desórdenes de sueño en los atletas," Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2019.
- [7] O. López, "Análisis y Reconocimiento de Patrones de Señales Biomédicas Relacionadas a las Etapas de Sueño," Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2020.
- [8] L. Guerrero, "Diseño e Implementación de un Sistema Generador de Pulsos Binaurales para el Estudio del Impacto de los Pulsos en la Calidad de Sueño," Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2020.
- [9] F. S. Luyster, P. J. Strollo, P. C. Zee y J. K. Walsh, "Sleep: a health imperative," *Sleep*, vol. 35, n.º 6, págs. 727-734, 2012.
- [10] C. A. Vinuesa Bonilla y col., "Sistema para monitoreo de ondas cerebrales en estudios de pulsos binaurales con ritmo theta sobre los procesos cognitivos y emocionales," B.S. thesis, Quito: USFQ, 2016, 2016.
- [11] M. G. Melissa Vollrath, *The McGill Physiology Virtual Laboratory*, https://www.medicine.mcgill.ca/physio/vlab/biomed_signals/eeg_n.htm#:~:text=The%20recorded%20waveforms%20reflect%20the,amplitude%20and%20the%20slowest%20waves., [Online; accessed 30-March-2020], 2005.
- [12] J. LaRocco, M. D. Le y D.-G. Paeng, "A systemic review of available low-cost EEG headsets used for drowsiness detection," *Frontiers in neuroinformatics*, vol. 14, 2020.
- [13] B. M. Altevogt, H. R. Colten y col., "Sleep disorders and sleep deprivation: an unmet public health problem," 2006.
- [14] A. Dey, "Machine learning algorithms: a review," *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 7, n.º 3, págs. 1174-1179, 2016.
- [15] T. O. Ayodele, "Types of machine learning algorithms," *New advances in machine learning*, vol. 3, págs. 19-48, 2010.
- [16] T. W. David Anderson Dennis Sweeney, *Estadística para negocios y economía*. Av. Santa Fe, núm. 505, piso 12 Col. Cruz Manca, Santa Fe C.P. 05349, México, D.F.: South-Western Cengage Learning, 2011.