

# Sistema Integrado de Monitoreo del Sueño Mediante Adquisición y Procesamiento de Señales Bioeléctricas

D. Manzano, S. Vallejo, A. Cifuentes, J. Diaz, E. Morales

II. ESTADO DEL ARTE E INVESTIGACIÓN

## I. INTRODUCCIÓN

**1.1 Planteamiento del Problema.** El sueño es un proceso fisiológico fundamental para la salud humana. Actualmente, el monitoreo de los patrones de sueño se realiza principalmente en entornos clínicos con equipos costosos y poco accesibles. Se requiere un sistema de monitoreo de sueño más accesible y portable que permita la adquisición de datos en tiempo real para su posterior análisis.

**1.2 Justificación del Proyecto.** El desarrollo de una PCB diseñada específicamente para la captación de señales cerebrales durante el sueño permitirá obtener información relevante para el análisis de los patrones de sueño. Con el uso de sensores adecuados y procesamiento de datos eficiente, el sistema podrá ser utilizado tanto en entornos clínicos como en estudios personales del sueño.

## 1.3 Objetivos

**1.3.1 Objetivo General.** Diseñar y fabricar una PCB capaz de adquirir y procesar frecuencias cerebrales mediante sensores adecuados, permitiendo la visualización y análisis de datos en un sistema de almacenamiento o en una interfaz digital.

### 1.3.2 Objetivos Específicos.

Investigar tecnologías y componentes adecuados para la captura de frecuencias cerebrales.

Diseñar el circuito en software de simulación y desarrollar el esquemático de la PCB.

Fabricar la PCB e integrar los componentes necesarios para el sistema.

Validar la captación y procesamiento de frecuencias cerebrales mediante pruebas de adquisición de datos.

Analizar los datos adquiridos utilizando software de procesamiento de señales.

**2.1 Revisión de Tecnologías Existentes.** Actualmente, el monitoreo del sueño se realiza mediante poligrafía y electroencefalografía (EEG). Dispositivos comerciales como Muse, OpenBCI y Emotiv han avanzado en la adquisición de señales cerebrales con hardware accesible. Sin embargo, estos dispositivos presentan limitaciones en cuanto a personalización y procesamiento avanzado de datos.

**2.2 Sistemas similares y soluciones comerciales.** Entre las soluciones comerciales existentes, OpenBCI y Emotiv ofrecen plataformas abiertas para la adquisición de EEG, aunque su costo sigue siendo elevado para usuarios individuales. Por otro lado, Muse se enfoca en aplicaciones de meditación y relajación, limitando su aplicabilidad en estudios del sueño.

## 2.3 Ventajas y desventajas de sistemas actuales.

- **Ventajas:** Accesibilidad relativa, integración con software de análisis, tecnología no invasiva.
- **Desventajas:** Alto costo, dependencia de plataformas comerciales, poca flexibilidad en diseño de hardware y software.

**2.4 Propuesta de innovación.** El proyecto propone el diseño de una PCB personalizada para la adquisición de frecuencias cerebrales durante el sueño, optimizando costos y permitiendo la integración con software de procesamiento de señales abierto.

**2.5 Hipótesis del proyecto.** El diseño de una PCB con electrodos y amplificadores adecuados permitirá la adquisición de señales cerebrales con suficiente precisión para analizar los patrones de sueño.

## III. DISEÑO DEL SISTEMA

**3.1 Descripción general del Sistema.** El sistema consta de una PCB equipada con sensores de EEG, un circuito de amplificación y filtrado, y un microcontrolador encargado del procesamiento y transmisión de datos. La información obtenida se podrá visualizar en una interfaz digital para su posterior análisis.

**3.2 Arquitectura del Sistema.** El sistema se compone de las siguientes secciones:

- Adquisición de señales: Electrodo de gel para captar las frecuencias cerebrales.
- Amplificación y filtrado: Uso de amplificadores como el INA114 o AD8226 para mejorar la calidad de la señal.
- Procesamiento y almacenamiento: Microcontrolador ESP32 para digitalizar y transmitir los datos.
- Visualización de datos: Software de procesamiento para el análisis de patrones de sueño.

### 3.3 Diagrama de bloques y flujo de datos.



**3.4 Diseño electrónico.** El diseño electrónico del sistema de monitoreo del sueño se basa en un circuito de adquisición de señales biológicas, tomando como referencia circuitos como el AD8232. Este diseño permite captar las señales eléctricas generadas por el cuerpo durante el sueño, especialmente las asociadas a la actividad cardíaca, con el fin de analizarlas posteriormente, los materiales a utilizar son los siguientes:

- Amplificador de instrumentación AD8226
- Amplificadores operacionales LMV321
- Resistencias de valores varios
- Capacitores de valores varios
- Jack de auriculares
- Electrodo
- Batería
- Puerto de carga micro-USB
- ESP32-S3-WROOM
- Pulsadores
- Regulador de 3.3V
- Switch
- Pantalla LCD

**3.4.1 Cálculos eléctricos.** Se realizaron los cálculos necesarios para definir los valores de resistencias, capacitores y otros componentes pasivos del circuito de acondicionamiento de señal. Estos cálculos se enfocaron principalmente en:

Filtros pasa bajos y pasa altos para eliminar ruido no deseado (por ejemplo, artefactos musculares o ruido de 60 Hz).

Ganancia del amplificador operacional, ajustada para que la señal de salida esté dentro del rango aceptable para el ADC del microcontrolador (ESP32).

### 3.5 Diseño de PCB

Una vez verificado el diseño mediante simulación, se procedió al desarrollo del diseño de PCB utilizando la herramienta EAGLE. El diseño contempla un tamaño compacto, con pistas cuidadosamente trazadas para evitar interferencias electromagnéticas, considerando lo siguiente:

- Rutas de señal analógica separadas de las digitales.
- Uso de planos de tierra para reducir el ruido.
- Conectores para electrodos y salida de datos hacia la ESP32.
- Tamaño ergonómico, pensando en la comodidad del usuario durante el monitoreo nocturno.

#### 3.5.1 Esquemático y normas

El diseño esquemático del sistema se desarrolló tomando como referencia circuitos de adquisición de señales bioeléctricas como el AD8226. Se incorporaron amplificadores de instrumentación (AD8226) y amplificadores operacionales (LMV321), junto con filtros pasa bajos y pasa altos para eliminar interferencias externas y artefactos musculares. Se siguieron las normas de diseño electrónico

recomendadas, tales como la separación de rutas analógicas y digitales, el uso de planos de tierra, y valores estándar de componentes para facilitar la manufactura. Además, se consideraron regulaciones de compatibilidad electromagnética (EMC) y seguridad en dispositivos portables de monitoreo biomédico.

### 3.5.2 Diseño del PCB y cumplimiento de estándares

El PCB fue diseñado en Eagle, priorizando un tamaño compacto y ergonómico, ideal para el uso durante el sueño. Se garantizaron buenas prácticas de diseño, como el enrutamiento óptimo de pistas, el aislamiento adecuado de señales sensibles, y la inclusión de planos de tierra para minimizar el ruido eléctrico. El diseño se exportó en formato Gerber, cumpliendo con los estándares IPC-2221 (normas generales para el diseño de PCB) y especificaciones del fabricante para asegurar su correcta fabricación. Se implementaron conectores específicos para electrodos y comunicación con la ESP32, siguiendo también criterios de robustez mecánica.

### 3.5.3 Pruebas automáticas del PCB

Una vez fabricada la PCB, se realizaron pruebas automáticas para verificar la continuidad de las pistas, la correcta soldadura de los componentes y la funcionalidad básica del circuito. Estas pruebas incluyeron la validación de señales en puntos críticos del circuito usando osciloscopio y multímetro, además de pruebas funcionales controladas para comprobar la adquisición de señales bioeléctricas. Se utilizó software de testeo en conjunto con la ESP32 para simular condiciones de operación y registrar el correcto flujo de datos desde los electrodos hasta la interfaz digital.

### 3.6 Creación de repositorio en GITHUB

A través de la herramienta GIT, se realizó la creación del repositorio por medio de CMD, donde se hizo una conexión con la cuenta principal de GITHUB y se establecieron los parámetros para el repositorio, configurando las ramas necesarias para el constante tráfico de archivos acerca del proyecto.

#### 3.6.1 Rama de PCB

Tras la correcta implementación del repositorio, se desarrolló la rama para la actualización de información acerca de la PCB. Aquí mismo, se han ido subiendo cada uno de los archivos con avances, correcciones y pruebas acerca de la PCB, donde con ayuda del tutor, se ha logrado llegar al diseño final.

<https://github.com/Juandaapagado00/Universidad/blob/main/proyecto6.md>

## IV. DESARROLLO DEL SISTEMA

### 4.1 Implementación del Hardware

Previo a la etapa de diseño y fabricación de la PCB, se realizaron pruebas experimentales en protoboard con el fin de verificar el comportamiento del circuito, especialmente en lo relacionado con las ganancias de las etapas amplificadoras y la efectividad del filtrado de señales. Estas pruebas permitieron observar el desempeño real de los componentes y ajustar, si era necesario, los valores de resistencias y condensadores, asegurando así que el diseño fuera funcional antes de su implementación definitiva en la tarjeta de circuito impreso.

Adicionalmente, se llevaron a cabo simulaciones en la plataforma Multisim para validar el comportamiento teórico del circuito. Estas simulaciones complementaron las pruebas prácticas al permitir una visualización detallada de la respuesta del sistema frente a distintas condiciones de entrada, facilitando la detección de posibles errores de diseño y contribuyendo a optimizar la selección de los valores de los componentes pasivos. Gracias a este proceso de validación dual —experimental y virtual— se garantizó una mayor confiabilidad y precisión en el diseño final de la PCB.

#### 4.1.1 Diseño de filtros analógicos

Filtro pasa banda

Pasa bajos segundo orden. 100Hz

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad R_{fcl} = \frac{1}{2\pi(F_c)C} = \frac{1}{2\pi(100\text{Hz})(1\mu\text{F})}$$

$$R_{fcl} = 1.6\text{k}\Omega$$

Filtro pasa altas segundo orden 0.5Hz

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad R_{fch} = \frac{1}{2\pi(F_c)C} = \frac{1}{2\pi(0.5\text{Hz})(1\mu\text{F})}$$

$$R_{fch} = 318.3\text{k}\Omega$$

Por facilidad de conseguir los valores de resistencias ya que estos valores pueden ser poco comunes se usó  $1.5\text{k}\Omega$  y  $470\text{k}\Omega$  y así mismo se comprobó que su funcionamiento era correcto con estos valores.

#### 4.1.2 Pruebas de señal y ajustes de amplificación

Para garantizar una correcta adquisición de las señales bioeléctricas, se realizaron pruebas de señal utilizando generadores de funciones y electrodos en condiciones controladas. Estas pruebas permitieron visualizar la respuesta del sistema ante señales de entrada de diferentes frecuencias y amplitudes, representativas de

la actividad cerebral durante el sueño. Se utilizó un osciloscopio para verificar la salida del circuito en cada etapa de amplificación y filtrado, lo cual facilitó la identificación de posibles distorsiones, ruidos o pérdidas de señal.

Durante este proceso, se ajustaron las ganancias de los amplificadores instrumentales y operacionales mediante la modificación de los valores de resistencias, con el objetivo de que la señal final se mantuviera dentro del rango aceptable para el convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador ESP32. También se evaluó la linealidad de la respuesta del sistema y la relación señal-ruido, aspectos fundamentales para asegurar la fidelidad de la adquisición.

Se comprobó que, con los valores seleccionados para los filtros pasa bajos (100 Hz) y pasa altos (0.5 Hz), el sistema era capaz de eliminar adecuadamente el ruido ambiental, como el generado por la red eléctrica (60 Hz), y los artefactos de movimiento. Estos filtros fueron implementados con componentes pasivos (resistencias y capacitores) de valores comerciales para facilitar la manufactura y reposición.

Como resultado de estas pruebas y ajustes, se confirmó que la ganancia total del sistema era suficiente para amplificar las señales de baja amplitud típicas de un EEG, sin saturar el ADC ni introducir distorsiones significativas. Esta validación fue clave para pasar a la etapa de diseño final de la PCB con plena confianza en el rendimiento del circuito.

## 4.2 Implementación del software

### 4.2.1. Programación de adquisición de datos

Se implementó un sistema mediante la lectura del puerto COM, donde se tomaban los datos de 12 bits de la ESP32 en un rango de 4095 datos. A partir de esto se realizaron las respectivas lecturas y muestras a través del Serial Plotter. En una fase de prueba se tomaron los datos del pin 34, el cual arrojaba datos aleatorios los cuales se evidenciaban correctamente. En la fase de lectura real, se conectó la señal resultante del circuito al pin especificado y se analizaron los datos vistos en el Serial Plotter. *Ver Anexos.*

### 4.2.2. Interfaz gráfica para visualización y control

A partir de los datos arrojados por el puerto COM, se realizó posteriormente el desarrollo de una aplicación en Python la cual, a través de la FFT, permite mostrar la frecuencia dominante en tiempo real mediante una gráfica. Adicionalmente, se genera otra gráfica, la cual muestra la forma de la grafica con el voltaje a través del tiempo. Esta aplicación se realizan usando todas las herramientas de Python para un funcionamiento

eficiente, rápido y compacto. *Ver Anexos.*

### 4.2.3. Integración del sistema

Al terminar el desarrollo del código, junto con todas las modificaciones que realizaron al probarlo con las señales de la ESP32, se implementó un .exe con el código terminado mediante PyInstaller. Todo este proceso fue realizado en una terminal de CMD, donde quedó una app portable para ser ejecutada en cualquier dispositivo.

## V. INNOVACIÓN Y PROPUESTA DE VALOR

### 5.1 Justificación de la innovación

La innovación principal del proyecto radica en el desarrollo de una PCB personalizada para la adquisición y procesamiento de señales bioeléctricas orientadas al monitoreo del sueño, utilizando componentes de bajo costo y accesibles. A diferencia de los sistemas comerciales existentes, que suelen ser cerrados, costosos y poco personalizables, esta solución permite adaptar el hardware a necesidades específicas del usuario o investigador.

Además, la integración con plataformas de desarrollo como el **ESP32**, junto con el diseño modular y abierto, facilita el uso de técnicas avanzadas de procesamiento de señales en tiempo real, algo que usualmente está restringido a equipos de gama alta. Esta capacidad permite un monitoreo más flexible, portable y económico, ideal tanto para contextos clínicos como para estudios personales.

### 5.2 Justificación de la innovación

El sistema propuesto presenta varias mejoras significativas frente a tecnologías existentes:

- **Portabilidad mejorada:** El diseño compacto y la alimentación autónoma por batería permiten un uso continuo durante la noche sin incomodidad para el usuario.
- **Costo reducido:** Al utilizar componentes discretos y un diseño optimizado en PCB, se disminuyen considerablemente los costos en comparación con soluciones comerciales como Muse, Emotiv u OpenBCI.
- **Personalización total:** El usuario puede modificar la configuración de filtros, ganancia y software según el tipo de señal bioeléctrica de interés, no limitado únicamente al EEG.
- **Interfaz abierta:** El uso de software libre y microcontroladores programables permite la integración con plataformas como Python, MATLAB, o aplicaciones móviles, ampliando las posibilidades de análisis.
- **Versatilidad en entornos clínicos o domésticos:** Puede ser utilizado como herramienta auxiliar en

diagnósticos médicos, investigaciones académicas o para el autocuidado personal del sueño.

### 5.3 Impacto en la sociedad y potencial de escalabilidad

El impacto social de este proyecto es considerable, ya que aborda una necesidad creciente de monitoreo accesible del sueño en una sociedad cada vez más afectada por trastornos del sueño y estrés. Al democratizar el acceso a herramientas de adquisición de señales cerebrales, se abren oportunidades para:

- **Pacientes con limitaciones económicas:** Acceder a una herramienta de monitoreo sin necesidad de acudir constantemente a centros médicos especializados.
- **Investigadores y estudiantes:** Contar con una plataforma educativa y de investigación flexible, ideal para instituciones educativas con recursos limitados.
- **Profesionales en salud y bienestar:** Incorporar esta tecnología en programas de seguimiento personalizado del sueño, meditación, o mejora cognitiva.

En cuanto a su escalabilidad, el sistema puede evolucionar fácilmente para incorporar **más canales de adquisición, sensores adicionales (como oxímetro, EMG, ECG)**, o conectividad inalámbrica avanzada (Wi-Fi, Bluetooth), permitiendo crear una plataforma completa de monitoreo biomédico a bajo costo. Su diseño modular también facilita su adaptación para otras aplicaciones clínicas o deportivas, incrementando su impacto potencial en múltiples sectores.

## VI. APLICACIONES Y CASOS DE USO

### 6.1 Aplicaciones en el campo médico

El sistema desarrollado tiene un alto potencial en el campo médico, especialmente en el diagnóstico y seguimiento de trastornos del sueño como el insomnio, apnea del sueño, narcolepsia, o el síndrome de piernas inquietas. Al permitir la adquisición de señales EEG durante el descanso nocturno, se puede analizar de forma precisa la arquitectura del sueño, como la identificación de fases NREM y REM.

Además, al ser un sistema portable y de bajo costo, podría ser empleado en telemedicina para monitoreo remoto de pacientes, reduciendo la necesidad de hospitalización o desplazamientos frecuentes a centros médicos. También se puede integrar como herramienta complementaria en estudios de salud mental, donde los patrones de sueño son un indicador clave en trastornos como la ansiedad o la depresión.

### 6.2 Aplicaciones en neurociencia y control BCI

Desde el punto de vista de la investigación en neurociencia, este sistema puede emplearse para estudios experimentales relacionados con la actividad cerebral en estados de reposo, atención, meditación o inducción al sueño. La adquisición de señales EEG es esencial en investigaciones cognitivas, ya que permite

estudiar los patrones neuronales sin procedimientos invasivos.

Asimismo, el diseño del sistema lo hace apto para proyectos de interfaz cerebro-computador (BCI), donde las señales cerebrales se utilizan como medio de control de dispositivos externos. Aunque este proyecto se centra en el monitoreo del sueño, la misma plataforma puede ser adaptada para reconocer patrones simples del EEG, permitiendo su uso en aplicaciones de control mental de prótesis, sillas de ruedas, teclados virtuales, entre otros.

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Logros alcanzados

Durante el desarrollo del proyecto se alcanzaron los siguientes logros destacados:

- **Diseño funcional de la PCB personalizada** a partir del análisis y simulación del circuito en protoboard, validando el comportamiento del sistema antes de su implementación definitiva.
- **Implementación de filtros pasa altos y pasa bajos analógicos**, con valores adaptados a componentes comerciales, que permitieron un correcto acondicionamiento de las señales EEG.
- **Integración del microcontrolador ESP32-S3-WROOM**, encargado de digitalizar y transmitir las señales hacia una interfaz digital para su análisis.
- **Simulación exitosa en Multisim**, lo cual permitió visualizar la respuesta teórica del sistema y validar las condiciones de operación de los filtros y amplificadores.
- **Creación de un repositorio GitHub** con una estructura organizada por ramas, lo que facilitó la gestión colaborativa del proyecto, especialmente para el diseño y validación de la PCB.
- **Desarrollo y validación experimental del hardware**, incluyendo pruebas de señal, ajustes de ganancia y verificación de filtrado efectivo en el prototipo físico.

### 7.2 Dificultades encontradas

A lo largo del proyecto, se enfrentaron distintas dificultades que representaron retos para el equipo:

- **Presencia de ruido e interferencias electromagnéticas** durante las pruebas iniciales en protoboard, que exigieron ajustes en el diseño del filtrado analógico.
- **Disponibilidad limitada de componentes** con valores específicos en el mercado, lo que obligó a recalcular resistencias y capacitores con base en valores comerciales y confirmar su correcto funcionamiento experimentalmente.
- **Desafíos en el diseño de la PCB**, relacionados con la

separación de señales analógicas y digitales, el enrutamiento de pistas y la gestión de planos de tierra para minimizar el ruido.

- **Tiempo requerido para validar experimentalmente el sistema**, especialmente durante la etapa de ajustes de amplificación y adquisición de señales reales.
- **Curva de aprendizaje con herramientas como EAGLE y Git**, que implicó esfuerzos adicionales en la estandarización del trabajo del equipo.

7.3 Mejoras y trabajo futuro

El sistema desarrollado constituye una base sólida para futuras mejoras e investigaciones, entre las cuales se proponen:

- **Optimización del diseño de la PCB**, incorporando blindaje para reducir interferencias, mejorando la distribución del plano de tierra y optimizando la disposición de componentes para una fabricación más eficiente.
- **Implementación de una interfaz de visualización en tiempo real**, que permita al usuario ver la señal adquirida y sus métricas directamente desde una pantalla o aplicación móvil.
- **Ampliación del sistema para la adquisición de otras señales fisiológicas**, como EMG o ECG, adaptando el hardware con filtros y canales adicionales.
- **Integración de procesamiento digital de señales (DSP)** en el ESP32, para realizar análisis en tiempo real como detección de fases del sueño o eliminación de artefactos.
- **Desarrollo de una carcasa ergonómica y portátil**, adecuada para el uso nocturno y compatible con estándares de dispositivos biomédicos portátiles.
- **Validación en contextos reales**, mediante pruebas en entornos clínicos o simulaciones prolongadas en usuarios reales, que permitan evaluar la precisión del sistema en el monitoreo del sueño.

VIII. ANEXOS

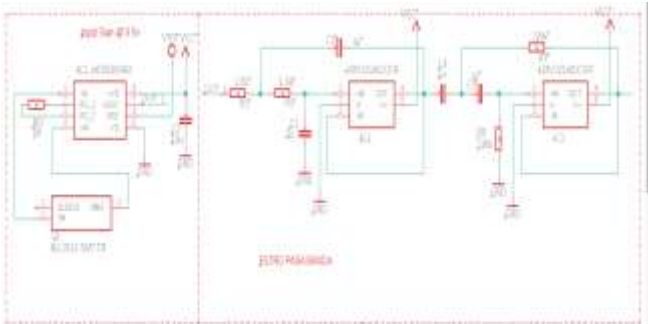


Fig. 1. Amplificador de instrumentación y Filtro pasa banda

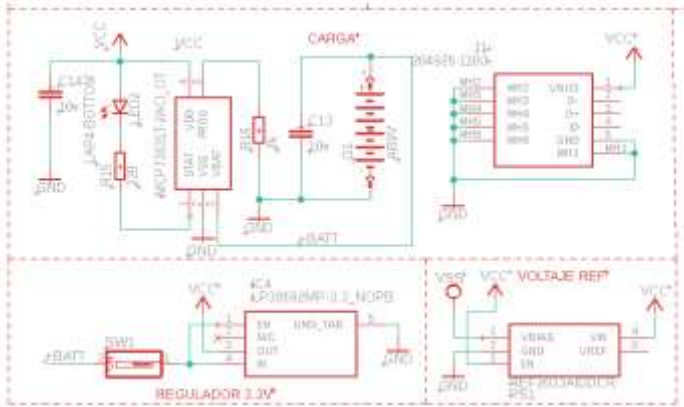


Fig. 2. Puerto de carga, Regulador 3.3v

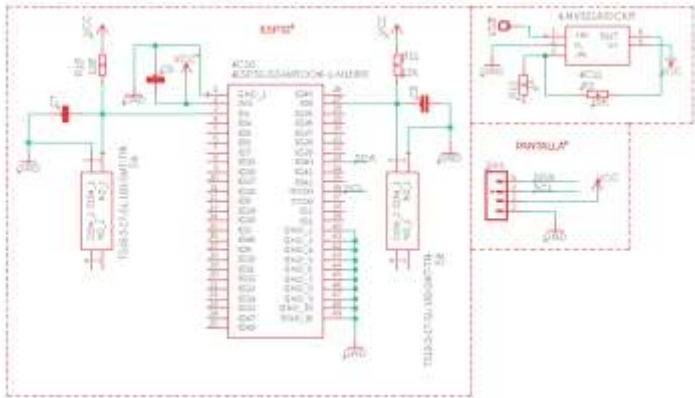


Fig. 3. Diagrama de ESP32, Pantalla

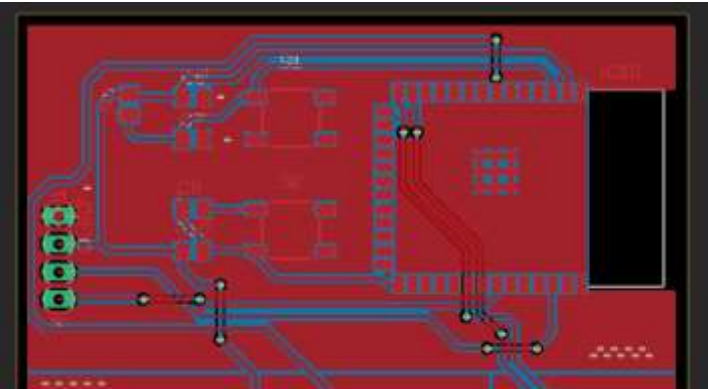


Fig. 4. Diseño de PCB en EAGLE



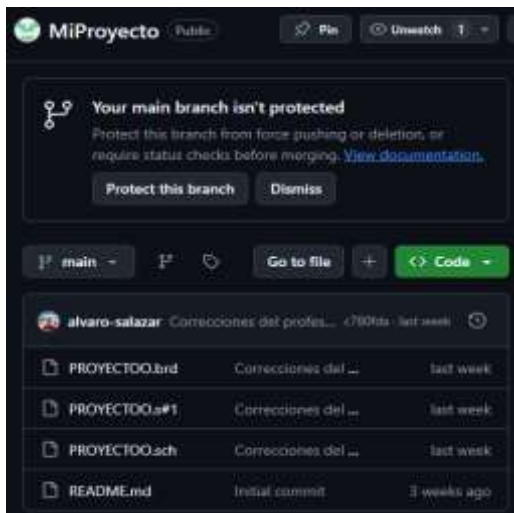


Fig. 5. Repositorio de el proyecto

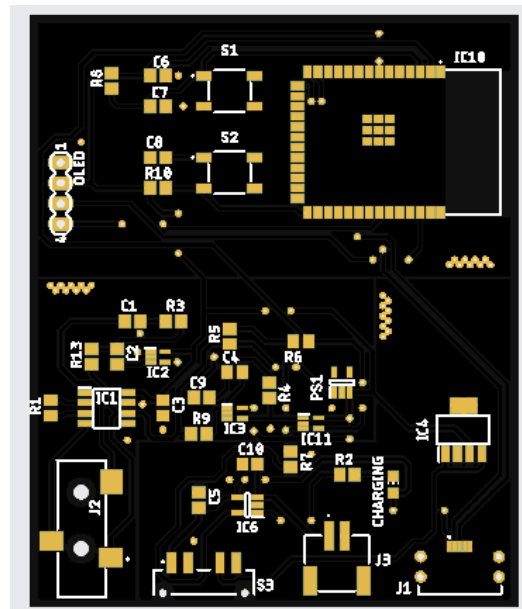


Fig 8. Diseño completo de PCB



Fig. 6. Rama de avance de PCB del proyecto

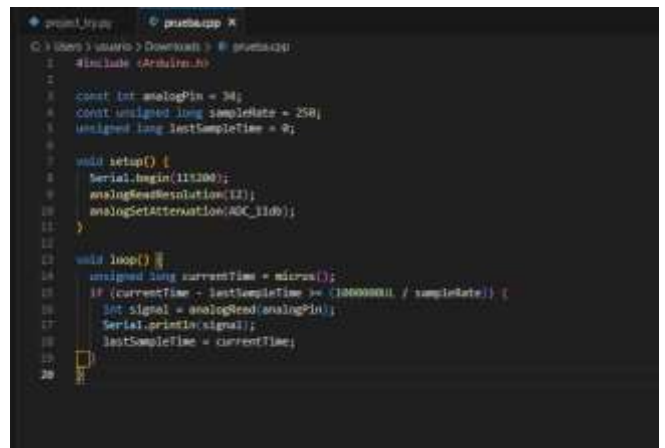


Fig 9. Configuración de desarrollo de sistema de menú de programa

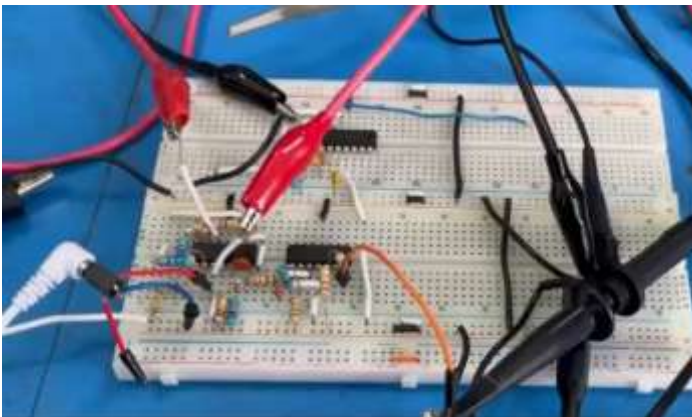


Fig 7. Diseño implementado en protoboard



Fig. 10. Interfaz de medición de frecuencias

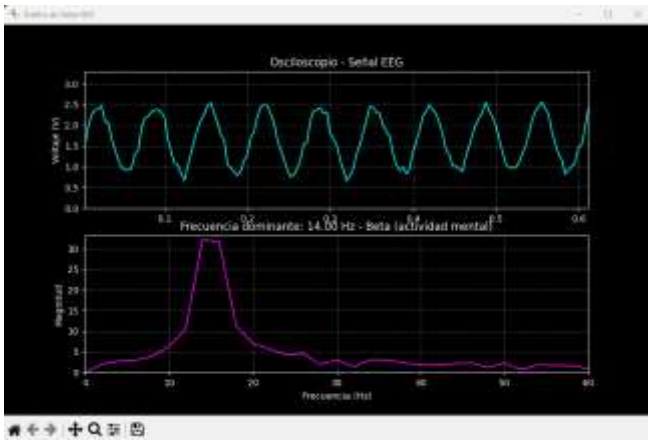


Fig. 11. Resultado de aplicación, diagrama de frecuencias y estado de el sueño

#### Referencias.

- Bekinschtein, T. A., & Manes, F. F. (2008). Neurobiología de la conciencia. *Vertex*, 19(78), 35-44.
- Viteri, C. (2007). Epilepsia y sueño. In *Anales del Sistema Sanitario de Navarra* (Vol. 30, pp. 107-112). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.
- Viteri, C. (2007). Epilepsia y sueño Epilepsy and sleep. *An. Sist. Sanit. Navar*, 30(Suplemento 1).
- Peraíta-Adrados, R. (2004). Epilepsia y ciclo sueño-vigilia. *Rev Neurol*, 38(2), 173-5.
- De Andrés, I., Garzón, M., & Reinoso-Suárez, F. (2015). Mecanismos neurobiológicos de los estados del ciclo vigilia-sueño. *Madrid: Editorial Medica Panamericana*, 62-75.