



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ESTUDIO DE CASO DE SEÑALES DE EEG CON EL DISPOSITIVO MINDFLEX EN
PERROS ROTTWEILER ENTRENADOS Y PERROS DE RAZA MIXTA NO ENTRENADOS**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO INGENIERA EN BIOMÉDICA

PRESENTADO POR:

21941011 KRISTEL NICOLE CARRANZA ALTAMIRANO

ASESOR METODOLÓGICO:

MANUEL GAMERO

CAMPUS SAN PEDRO SULA

ABRIL 2024

DEDICATORIA

Dedico el trabajo de investigación primeramente a Dios por siempre darme la fortaleza y la sabiduría para cumplir todo lo que me propongo. Y a mis padres, Marco Carranza y Marlén Altamirano, quienes han estado a mi lado brindándome su apoyo durante toda la carrera universitaria, y su amor incondicional es lo que me ha ayudado a la culminación de este trabajo. Les agradezco los consejos y el sacrificio que siempre han hecho para darme todo lo que necesito.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Manuel Gamero, quien me ha guiado a lo largo del periodo académico y me ha motivado a realizar un trabajo de calidad y a saber que siempre existe lugar para mejorar.

A Eduardo Zavala, por prestarme a sus dos perros, Kaiser y Blacky, quienes fueron parte de este trabajo y por quienes fue posible observar y analizar el comportamiento de las señales de EEG en canes entrenados y no entrenados.

EPÍGRAFE

"La experiencia es el nombre que damos a nuestros errores".

-Oscar Wilde

RESUMEN

El presente proyecto de investigación se centró en la necesidad de una herramienta que permitiera visualizar y analizar las señales de EEG en perros durante el entrenamiento, con el objetivo de mejorar la comprensión de las respuestas cerebrales de los canes y avanzar en el desarrollo de técnicas de entrenamiento más efectivas y humanas. Para comprender cómo los perros procesan y categorizan estímulos verbales y visuales, como expresiones faciales humanas y comandos, se mencionaron distintos autores que enfocaron sus estudios en el trabajo directo con animales, analizando diferentes factores, y aportando relevancia a este estudio. Se enmarcó en un enfoque cuantitativo y un diseño experimental para investigar de manera sistemática y objetiva los aspectos relacionados con el tema de estudio. Se emplearon cuatro sujetos de estudio caninos, garantizando un enfoque detallado en el comportamiento animal. El estudio se planteó como transversal, permitiendo la adquisición de datos en un momento específico del tiempo para un análisis preciso. Se logró capturar y analizar las ondas cerebrales de los canes, lo que permitió una mejor comprensión de sus respuestas cerebrales durante las sesiones de adiestramiento. Además, se obtuvieron datos relevantes sobre las ondas de EEG y se realizaron comparaciones entre los sujetos de prueba, lo que contribuyó a identificar patrones y diferencias en las respuestas cerebrales de los perros. Se observaron diferencias significativas en las bandas de frecuencia y en las magnitudes de las ondas cerebrales entre los perros entrenados y no entrenados durante el entrenamiento. Estas disparidades sugirieron una respuesta cerebral distinta ante los estímulos y tareas cognitivas presentadas.

Palabras clave — biomédica, entrenamiento, neurociencia, veterinaria

ABSTRACT

The present research project focused on the need for a tool that would allow the visualization and analysis of EEG signals in dogs during training, with the aim of improving the understanding of the brain responses of the dogs and advancing the development of techniques for more effective and humane training. To understand how dogs process and categorize verbal and visual stimuli, such as human facial expressions and commands, different authors were mentioned who focused their studies on direct work with animals, analyzing different factors, and providing relevance to this study. It was framed in a quantitative approach and an experimental design to systematically and objectively investigate the aspects related to the topic of study. Four canine study subjects were employed, ensuring a detailed focus on animal behavior. The study was proposed as cross-sectional, allowing the acquisition of data at a specific moment in time for precise analysis. It was possible to capture and analyze the dogs' brain waves, which allowed a better understanding of their brain responses during the training sessions. In addition, relevant data on the EEG waves were obtained and comparisons were made between the test subjects, which contributed to identifying patterns and differences in the dogs' brain responses. Significant differences in frequency bands and brain wave magnitudes were observed between trained and untrained dogs during training. These disparities suggested a different brain response to the stimuli and cognitive tasks presented.

Keywords — biomedical, neuroscience, training, veterinary

LISTA DE SIGLAS

EEG: Electroencefalografía

FFT: Transformada de Fourier

UNITEC: Universidad Tecnológica Centroamericana

VCC: Voltaje de Corriente Continua

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
II. ESTADO DEL ARTE.....	2
1.1. ANTECEDENTES.....	2
2.1. PROBLEMÁTICA.....	11
2.2. IMAGEN INTEGRADORA.....	12
2.3. LIMITACIONES.....	14
III. OBJETIVOS.....	20
3.1. OBJETIVO GENERAL	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
IV. MÉTODOS.....	21
4.1. OBJETIVO DEL MÉTODO	22
4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	24
4.2.1. VARIABLE INDEPENDIENTE.....	24
4.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES	25
4.3 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	26
27	
4.4. RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO	28
4.4.1. MATERIALES	28
1.2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	29
4.5.1. FASE DE DISEÑO	30
4.5.2. FASE DE DESARROLLO.....	30
4.5.3. FASE DE INTEGRACIÓN.....	30
4.6. IMAGEN DEL PROCESO	31
4.7. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN	33

4.7.1.	TIEMPO DE REGISTRO DE LAS SEÑALES	33
4.7.2.	CALIDAD DE LAS SEÑALES	33
4.7.3.	CALIDAD DEL CÓDIGO	34
4.7.4.	CARACTERÍSTICAS DEL ADIESTRAMIENTO ENTREGADO A LOS CANES	34
4.7.5.	TIEMPO DE RESPUESTA DEL PROTOTIPO	34
V.	RESULTADOS	36
5.1.	DEFINICIÓN DE MATERIALES, MÉTODOS, HERRAMIENTAS DEL PROTOTIPO.....	36
5.1.1.	REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE LOS COMPONENTES.....	36
5.1.2.	DISEÑO DEL SISTEMA.....	41
5.2.	CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO MINDFLEX Y ARDUINO UNO	45
5.2.1.	PROGRAMACIÓN DE ARDUINO UNO.....	45
5.2.2.	PROGRAMACIÓN MÓDULO BLUETOOTH HC-05 Y ARDUINO UNO	48
5.2.3.	EVALUACIÓN DE PRUEBA DE LAS ONDAS EN PROCESSING.....	51
5.3.	PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE SEÑALES	52
5.3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	52
5.3.2.	RECOLECCIÓN DE DATOS	56
5.3.3.	TRANSPORTACIÓN DE DATOS DE ARDUINO IDE CON PYTHON.....	57
5.3.4.	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS SEÑALES	58
5.3.5.	ESTADÍSTICA EN MINITAB PERROS ENTRENADOS Y NO ENTRENADOS.....	72
5.4.	EFICIENCIA DEL SISTEMA	82
5.4.1.	TIEMPO DE RESPUESTA DEL SISTEMA.....	83
VI.	DISCUSIÓN.....	86
6.1.	LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	86
VII.	CONCLUSIONES	88
VIII.	REFERENCIAS.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limitantes de Estudios Pasados.....	14
Tabla 2. Objetivo del Método.....	21
Tabla 3. Objetivo del Método.....	22
Tabla 4. Operacionalización de las variables	26
Tabla 5. Especificaciones técnicas Arduino Uno ATmega328.....	37
Tabla 6. Especificaciones técnicas del módulo Bluetooth HC-05	39
Tabla 7. Especificaciones técnicas del Booster DC MT3608	40
Tabla 8. Especificaciones técnicas del Dispositivo Mindflex.....	40
Tabla 9. Tabla de Costos.....	44
Tabla 10. Bibliotecas necesarias para la comunicación entre Arduino y el dispositivo Mindflex.....	45
Tabla 11. Ondas cerebrales y su orden según la programación en Arduino	47
Tabla 12. Conexiones del módulo Bluetooth “slave” hacia el Arduino Uno	48
Tabla 13. Características de los sujetos de prueba.....	54
Tabla 14. Condición calidad de la señal	55
Tabla 15. Ondas de EEG relevantes en el estudio para análisis.....	64
Tabla 16. Comandos utilizados en las sesiones de adiestramiento	66
Tabla 17. Magnitud Ondas Cerebrales Sujeto 1 vs Sujeto 2.....	71
Tabla 18. Análisis de Varianza Sujeto 1 vs Sujeto 2	72
Tabla 19. Resumen del Modelo	74
Tabla 20. Medias de los grupos.....	74
Tabla 21. Tiempo de respuesta del sistema en los sujetos de prueba	84
Tabla 22. Tiempo de respuesta del sistema en el Sujeto 1.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Imagen Integradora	13
Ilustración 2. Variable dependiente y variables independientes	24
Ilustración 3. Metodología en V	30
Ilustración 4. Etapa I. Ensamblaje Y Validación Del Prototipo	31
Ilustración 5. Etapa II. Adquisición, registro y validación de las señales de EEG....	32
Ilustración 6. Análisis de datos de las señales cerebrales caninas	33
Ilustración 7. Diseño del sistema.....	36
Ilustración 8. Arduino Uno ATmega328 en el dispositivo Mindflex.....	38
Ilustración 9. Diseño esquemático del prototipo	42
Ilustración 10. Conexión de cableado eléctrico del Arduino hacia el Mindflex	43
Ilustración 11. Conexión del módulo Booster	44
Ilustración 12. Programación de Biblioteca Brain para visualización de las señales de EEG con módulo Bluetooth "slave"	46
Ilustración 13. Datos de los rangos de ondas cerebrales en Arduino IDE.....	48
Ilustración 14. Configuración módulos Bluetooth HC-05 "Slave" y "Master"	49
Ilustración 15. Código módulo Bluetooth "master" en Arduino Ide.....	50
Ilustración 16. Señales en Processing Sujeto 2 No Entrenado	52
Ilustración 17. Sujeto 2 no entrenado soporte de cabeza	53
Ilustración 18. Colocación del prototipo en Sujeto 3.....	57
Ilustración 19. Código Python Transportar Valores a Excel.....	58
Ilustración 20. Transformada Rápida de Fourier en Matlab	59
Ilustración 21. Código Matlab índices de frecuencias.....	61
Ilustración 22. Parte final del código Matlab de FFT	61
Ilustración 23. Sujeto 1 Señal en el dominio del tiempo y transformada de Fourier.....	62

Ilustración 24. Código de Matlab visualización de las ondas de frecuencia en el tiempo de duración del entrenamiento.....	63
Ilustración 25. Comportamiento de las ondas en el tiempo	64
Ilustración 26. Sujeto 1 pruebas preliminares a la adquisición de datos.....	65
Ilustración 27. Sesión Sujeto 1 entrenado.....	66
Ilustración 28. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 1 Entrenado	67
Ilustración 29. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 2 No Entrenado	68
Ilustración 30. Comandos en Sujeto 3 Entrenado.....	69
Ilustración 31. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 3 Entrenado	69
Ilustración 32. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 4 No Entrenado	70
Ilustración 33. Bandas de frecuencia en perro entrenado y no entrenado (Sujeto 1 vs Sujeto 2)	70
Ilustración 34. Magnitud de Low Beta en Sujeto 1 vs Sujeto 2.....	76
Ilustración 35. Magnitud de la onda High Gamma Sujeto 1 vs. Sujeto 2	76
Ilustración 36. Magnitud en onda Low Beta Sujeto 3 vs. Sujeto 4	77
Ilustración 37. Magnitud High Gamma Sujeto 3 vs. Sujeto 4	78
Ilustración 38. Intervalos de Índices de Frecuencia en Sujeto 1 (perro entrenado)	78
Ilustración 39. Intervalos de índices de frecuencia en Sujeto 2 (perro no entrenado)	79
Ilustración 40. Índices de frecuencia en onda Low Beta y High Gamma Sujeto 1 vs Sujeto 2	80
Ilustración 41. Ondas de frecuencia en Sujeto 3 y Sujeto 4	81

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tiempo de respuesta del sistema en el Sujeto 2.....	93
Anexo 2. Entrenamiento Sujeto 3 (perro entrenado).....	95

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula Calidad de la señal.....	55
Ecuación 2. Calidad de la señal Sujeto 1	55

I. INTRODUCCIÓN

Los perros son compañeros valiosos para los seres humanos, conocidos por su amor y lealtad. Sin embargo, también son animales con necesidades instintivas que requieren estimulación cerebral y entrenamiento adecuado para convivir armoniosamente con las personas. Es importante reconocer que el adiestramiento canino no es una práctica negativa, sino fundamental para asegurar una relación segura y armoniosa entre los perros y sus dueños.

Un electroencefalograma (EEG) es un procedimiento médico que registra la actividad eléctrica en el cerebro mediante la colocación de electrodos metálicos en el cuero cabelludo. Las neuronas del cerebro se comunican entre sí mediante impulsos eléctricos que ocurren constantemente, incluso durante el sueño (Moeller et al., 2023). La electroencefalografía ha sido durante mucho tiempo un pilar en el diagnóstico en humanos, pero desafíos técnicos han limitado su papel clínico en canes (Löscher & Worrell, 2022). La electroencefalografía implica la captura y análisis de los impulsos eléctricos producidos por las neuronas cerebrales, los cuales son detectados en la superficie del cráneo. El registro EEG es una representación gráfica obtenida mediante electrodos que muestra la variación de potencial entre ellos, ya sea en un papel en movimiento o en la pantalla de una computadora. De esta manera, el gráfico del EEG es bidimensional, mostrando el tiempo en el eje horizontal y el voltaje en el eje vertical (Pellegrino, 2015).

Actualmente, no se cuenta con una manera de visualizar las señales cerebrales en perros en tiempo real en el momento de su adiestramiento, esto permitiría comprender y analizar posibles técnicas de entrenamiento mientras se van interpretando las ondas cerebrales en respuesta a los comandos. Un dispositivo asequible capaz de medir la actividad cerebral en perros facilitaría el procedimiento.

La siguiente investigación se centrará en el desarrollo de un prototipo eficiente y a bajo costo destinado a la medición de señales cerebrales en caninos, en el que se pueda hacer uso del mismo con los sujetos en movimiento, enfocado en canes entrenados y no entrenados.

II. ESTADO DEL ARTE

El siguiente capítulo a continuación se basó en una recopilación de todos los estudios científicos previamente seleccionados, que se consideraron como base y soporte para este estudio.

1.1. ANTECEDENTES

El electroencefalograma (EEG) es una tecnología a través de la cual se puede medir la actividad eléctrica de las neuronas en la región cerebro cortical. Esto se realiza mediante electrodos fijados en diferentes posiciones de la cabeza (Kumar et al., 2023).

Un estudio sobre potenciales relacionados con eventos (ERPs) en perros, elaborado por Magyari et al., (2020) llamando «***Event-related potentials reveal limited readiness to access phonetic details during word processing in dogs***» en relación con el procesamiento de palabras y detalles fonéticos tiene varias implicaciones para la comprensión de la comunicación y cognición canina. Se sugirió que los perros pueden tener una capacidad limitada para acceder a detalles fonéticos al procesar palabras, lo que podría afectar su capacidad para expandir su vocabulario y comprender diferencias sutiles en los sonidos del habla. Además, se propuso que las respuestas de ERPs de los perros a palabras y palabras sin sentido fonéticamente similares pueden reflejar sesgos de atención y procesamiento, similares a los observados en infantes humanos más jóvenes. La sensibilidad de los perros a las palabras conocidas, mostrando diferencias en los ERPs entre palabras de instrucción familiares y palabras sin sentido fonéticamente diferentes, sugiere que los perros pueden distinguir entre palabras que escuchan con frecuencia y estímulos desconocidos.

El objetivo principal del estudio fue investigar la capacidad de los perros para procesar palabras y acceder a detalles fonéticos durante el procesamiento del lenguaje. Se buscó determinar si los perros mostraban sensibilidad a las palabras conocidas y si tenían la capacidad de distinguir entre palabras familiares y palabras sin sentido fonéticamente similares.

En los resultados de este estudio, se encontró que los perros presentaron una capacidad limitada para acceder a detalles fonéticos durante el procesamiento de palabras, ya que no hubo diferencias significativas en los ERPs entre palabras conocidas y palabras sin sentido fonéticamente similares. El estudio mencionó que, al reconocer la sensibilidad de los perros a las palabras conocidas y su capacidad limitada para acceder a detalles fonéticos, los entrenadores y dueños pueden refinar sus estrategias de comunicación. El uso de señales verbales claras y consistentes combinadas con señales visuales o gestuales puede mejorar la comprensión y la capacidad de respuesta de los perros durante el entrenamiento y las interacciones cotidianas.

Dentro de los estudios relevantes para esta investigación, Kujala et al., (2021) en el estudio «***Time-resolved classification of dog brain signals reveals early processing of faces, species and emotion***», investigó el procesamiento temprano de la información social visual en perros utilizando registros de EEG no invasivos. La investigación se llevó a cabo en la Facultad de Medicina Veterinaria de la Universidad de Helsinki, centrándose en comprender cómo los perros procesan y categorizan estímulos visuales como expresiones faciales humanas y de perros, objetos y caras con fases aleatorias. Los perros fueron equipados con electrodos de EEG neonatales y un amplificador de EEG portátil, lo que les permitió moverse libremente durante la adquisición de datos. La configuración de EEG incluyó siete electrodos colocados sobre regiones cerebrales específicas, con datos siendo filtrados en banda y digitalizados para su análisis.

El estudio buscaba profundizar en el conocimiento de cómo los perros procesan y distinguen entre diferentes categorías visuales, como caras, especies y emociones, y comparar los procesos con la literatura existente sobre estudios de potenciales relacionados con eventos (ERP) en humanos y estudios de neuroimagen en perros.

Los resultados principales de este estudio revelaron la existencia de ventanas temporales críticas para el procesamiento de información visual social en perros, identificando intervalos significativos a los 100-140 ms y 240-280 ms después del inicio del estímulo. Además, se logró establecer modelos de fuentes corticales para las señales de EEG medidas, permitiendo estimar los generadores de corriente cortical asociados a las respuestas visuales.

Schork et al., (2023) en un estudio llamado «**Testing the Accuracy of Wearable Technology to Assess Sleep Behaviour in Domestic Dogs: A Prospective Tool for Animal Welfare Assessment in Kennels**», afirma que en especies no-humanas, la mayoría de las veces es necesario implantar los electrodos de forma quirúrgica y bajo anestesia, lo cual puede presentar un riesgo en cuanto a la salud del animal. El uso de electrodos adhesivos se probó solo en vacas y búhos, pero se presentaron problemas como en que los animales se quitaban los electrodos o sufrían atenuación de la señal con el tiempo, lo que afectaba los datos recolectados.

El principal objetivo de este estudio fue probar la precisión de la tecnología ponible para investigar el comportamiento del sueño en perros domésticos. Los resultados de este estudio tienen implicaciones significativas para mejorar la evaluación del bienestar animal en perreras y otras instalaciones de cuidado animal. El uso de tecnología ponible para monitorear el comportamiento del sueño en perros domésticos tiene el potencial de proporcionar una herramienta útil y menos tiempo consumidor para evaluar el comportamiento y el bienestar de los perros.

Aunque hubo diferencias en ciertos comportamientos entre los métodos de medición, como la inactividad y la actividad durante las grabaciones diurnas, los resultados generales mostraron que la tecnología ponible y las observaciones directas no diferían estadísticamente en cuanto a la actividad total y el sueño total registrados. Esto sugiere que la tecnología ponible tiene el potencial de ser una herramienta efectiva para evaluar el comportamiento y el bienestar de los perros.

Obtener señales de animales en libre movimiento presenta varios desafíos, es por esto que hay un número limitado de investigaciones en animales como caninos. Uno de estos desafíos es la presencia de artefactos ocasionados por diferentes potenciales biológicos que se mezclan con la señal del EEG (Silva et al., 2023).

Una característica clave de las señales de cerebro analizadas es la presencia de oscilaciones rítmicas en distintas bandas de frecuencia, usualmente entre 0.05 Hz y 500 Hz. En muchos estudios, tanto en animales como en humanos, se encontraron relaciones entre estas oscilaciones y diferentes funciones del cerebro desde funciones cognitivas

hasta sensorio motoras; también se notó que las oscilaciones se veían afectadas por alteraciones neurológicas y psiquiátricas (Sinitsyn et al., 2023).

En años recientes se han llevado a cabo estudios en animales enfocándose en señales encefalográficas. Los hallazgos del estudio «**Perioperative Brain Function Monitoring with Electroencephalography in Horses Anesthetized with Multimodal Balanced Anesthetic Protocol Subjected to Surgeries**» realizado por Murillo et al., (2022), son que la electroencefalografía (EEG) se puede utilizar para monitorear continuamente los cambios en el estado cerebral de un caballo anestesiado con isoflurano con un protocolo anestésico multimodal. El estudio encontró que los índices de EEG procesados, incluyendo el índice de estado del paciente, la relación de supresión de ráfagas y la frecuencia del borde espectral del 95%, cambiaron significativamente entre las etapas de la anestesia. La presencia de actividades de ondas lentas de EEG y supresión de ráfagas implica que los caballos estaban profundamente inconscientes durante la anestesia.

El objetivo principal era investigar el uso de la electroencefalografía (EEG) y los índices derivados de la EEG (procesados) para detectar cambios en la actividad cerebral peroperatoria en 12 caballos adultos anestesiados sometidos a diversas intervenciones quirúrgicas. Se utilizaron electrodos frontales junto con el monitor Sedline/Root en estos caballos desde poco después de la inducción de la anestesia y se continuó hasta que el caballo intentó ponerse de pie por primera vez en la recuperación.

El resultado de este estudio demostró que el EEG puede utilizarse para monitorizar continuamente los cambios de estado cerebral de un caballo anestesiado con isoflurano con un protocolo anestésico multimodal.

El estudio «**Differences in dogs' event-related potentials in response to human and dog vocal stimuli; a non-invasive study**» realizado por Bálint et al., (2022) investigó cómo los perros procesan y responden a los estímulos vocales de humanos y perros. El objetivo principal fue analizar las diferencias en las respuestas neuronales de los perros a vocalizaciones humanas y caninas, lo que proporcionó información valiosa sobre los mecanismos cognitivos y neurales involucrados en la percepción vocal de los perros.

Los descubrimientos clave del estudio incluyen diferencias significativas en los potenciales relacionados con eventos en perros en respuesta a estímulos vocales humanos y de perros. Estas diferencias indican una capacidad distintiva de procesamiento neural en los perros en relación con las vocalizaciones de humanos y perros.

Este estudio contribuye a la comprensión de los procesos cognitivos y neurales involucrados en la percepción vocal de los perros, demostrando su capacidad para distinguir entre vocalizaciones humanas y caninas. Estos hallazgos sugieren una sofisticada capacidad de procesamiento auditivo en los perros.

Las implicaciones prácticas de este estudio incluyen el potencial para mejorar el entrenamiento, la comunicación y la interacción entre humanos y perros, al comprender mejor cómo los perros perciben y procesan las vocalizaciones humanas y caninas. Esto puede tener aplicaciones en el adiestramiento de perros y en la comprensión de las interacciones sociales entre perros y humanos.

En un estudio de revisión de literatura titulado «***The role of trained and untrained dogs in the detection and warning of seizures***» realizado por Luff et al., (2024) se exploró el papel potencial de los perros, tanto entrenados como no entrenados, en ayudar a las personas con epilepsia mediante la detección y la advertencia de convulsiones; evaluar la efectividad de los perros entrenados para alertar sobre convulsiones y la capacidad natural de los perros no entrenados para detectar convulsiones, así como evaluar las implicaciones de esto para las personas con epilepsia.

El objetivo principal de este estudio es investigar la capacidad de los perros entrenados para alertar sobre convulsiones en personas con epilepsia. Además, el estudio tiene como objetivo explorar la capacidad natural de los perros no entrenados para detectar convulsiones y brindar apoyo a las personas durante y después de una convulsión.

La investigación reveló que los perros entrenados para alertar sobre convulsiones demuestran una capacidad notable para detectar convulsiones en personas con epilepsia, lo que lleva a una reducción en la frecuencia de las convulsiones y una mejora en la calidad de vida. Además, los perros no entrenados han demostrado la capacidad

de detectar convulsiones y brindar apoyo a las personas durante y después de una convulsión, lo que indica su capacidad natural para ayudar a las personas con epilepsia.

Un estudio de relevancia para este estudio, fue «***A Novel Implanted Device to Wirelessly Record and Analyze Continuous Intracranial Canine EEG***» por Davis et al., (2011), se basó en la implementación de un dispositivo implantado para grabar y analizar de forma inalámbrica y de manera continua las señales de EEG intracraneal en perros. El dispositivo utilizó 16 sensores intracraneales a una unidad de adquisición y transmisión implantada y recargable. Estos datos fueron luego enviados de forma inalámbrica a un dispositivo externo de almacenamiento, análisis y comunicación de resultados.

El objetivo principal fue evaluar la viabilidad de la grabación continua de EEG ambulatorio en perros en libertad, así como el registro de eventos de ictus espontáneos y comparar su similitud con las convulsiones humanas en EEG.

Los resultados de este estudio demostraron la eficacia del sistema de monitoreo implantable en perros, incluyendo la integridad de los electrodos, la tolerabilidad de la implantación, la fidelidad de la grabación, el funcionamiento de los dispositivos externos y la detección en tiempo real de eventos epilépticos.

En el estudio «***Neural processes underlying statistical learning for speech segmentation in dogs***» por Boros et al., (2021) se enfocó en investigar los procesos neurales subyacentes al aprendizaje estadístico en perros, específicamente en relación con la segmentación del habla.

El objetivo principal es comprender cómo los perros procesan y aprenden palabras a partir de las regularidades estadísticas presentes en el habla. Para lograr esto, se utilizaron técnicas de neuroimagen funcional, como la resonancia magnética funcional (fMRI) y electroencefalografía (EEG), para examinar la actividad cerebral de los perros mientras escuchaban estímulos de habla estructurados y no estructurados.

Los resultados del estudio revelaron que los perros son capaces de extraer información estadística del habla, lo que les permite segmentar y aprender palabras basadas en patrones de co-ocurrencia y probabilidades de transición entre sílabas. Se observaron diferencias en la actividad cerebral de los perros cuando se expusieron a estímulos de habla estructurados en comparación con estímulos no estructurados, lo que

sugiere que los perros son sensibles a las regularidades estadísticas del habla y pueden utilizar esta información para procesar el lenguaje de manera similar a los humanos.

Un estudio titulado «**Comparative Study of Pain-Related Responses of Male Piglets up to Seven Days of Age to the Application of Different Local Anaesthetics and Subsequent Castration**» realizado por Söbbeler et al., (2022), mostró que la inyección intratesticular de anestésico local es más efectiva para reducir las respuestas relacionadas con el dolor en los lechones machos durante la castración en comparación con la inyección intramuscular o subcutánea. Además, se encontró que la administración de una menor cantidad de anestésico local también puede ser efectiva para reducir el dolor en los lechones machos durante la castración.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar la idoneidad de la anestesia local para la castración de lechones menores de 8 días de edad. El estudio también buscó reducir las respuestas de estrés causadas por el manejo y la restricción de los lechones mediante el uso de anestesia superficial constante y reproducible basada en la concentración subanestésica de isoflurano.

Se utilizó el EEG (electroencefalograma) para evaluar las respuestas de los lechones machos al dolor durante la castración. Sin embargo, los resultados del EEG no fueron concluyentes y no se pudieron detectar consistentemente reacciones de desincronización o sincronización en respuesta a estímulos dolorosos. Esto puede deberse al retraso en la visualización de los valores de índice y etapas del monitor de Narcotrend utilizado en el estudio. A pesar de esto, se encontró que otras variables, como la frecuencia respiratoria, la presión arterial, la frecuencia cardíaca y sus variabilidades, y los movimientos nociceptivos, fueron efectivas para evaluar el dolor en los lechones machos durante la castración.

Hirashima et al., (2022) en el estudio «**The Potential of Bemegride as an Activation Agent in Electroencephalography in Dogs**» exploró el uso de la bemegride como agente de activación en la electroencefalografía (EEG) canina, con un enfoque en la detección y manejo de la epilepsia en perros. La bemegride es un agente farmacológico que se utiliza para inducir actividad eléctrica cerebral en perros durante

las pruebas de EEG, lo que puede ser útil en el diagnóstico y tratamiento de trastornos neurológicos, incluida la epilepsia.

El principal objetivo del estudio fue evaluar la eficacia y seguridad de la bemegrade como agente de activación en EEG en perros, centrándose en la detección de actividad epiléptica y la identificación de zonas irritativas en el cerebro de los perros. Se observaron algunos efectos secundarios potenciales asociados con el uso de bemegrade, como cambios en los patrones de respiración.

El uso de la bemegrade como agente de activación en EEG en perros mostró promesa en la detección y manejo de la epilepsia canina. Sin embargo, es importante considerar los posibles efectos secundarios y realizar evaluaciones exhaustivas para garantizar la seguridad y eficacia de este enfoque en la práctica clínica veterinaria.

Cui et al., (2023) presentó el **estudio «Predicting Motor Imagery BCI Performance Based on EEG Microstate Analysis»** sobre el uso del EEG para analizar la imaginación motora y su posible aplicación en la interfaz cerebro-computadora (BCI). Los hallazgos clave del estudio incluyen la asociación de ciertos microestados EEG con redes cerebrales específicas, así como la relación entre la duración media de ciertos microestados y el rendimiento de la BCI basada en la imaginación motora. Estos resultados sugieren que la actividad cerebral medida a través del EEG puede proporcionar información predictiva sobre el rendimiento de la BCI.

El objetivo principal del estudio fue investigar la relación entre los microestados EEG durante la imaginación motora y el rendimiento de la BCI. Los autores buscan identificar patrones en la actividad cerebral que puedan predecir la eficacia de la BCI basada en la imaginación motora.

El estudio destaca la importancia de la actividad cerebral medida a través del EEG en la predicción del rendimiento de la BCI basada en la imaginación motora. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para el desarrollo de tecnologías BCI más avanzadas y su aplicación en entornos del mundo real.

El estudio **«Effects of Anesthesia on Cerebral Blood Flow and Functional Connectivity of Nonhuman Primates»** elaborado por Zhang, (2022), ofrece una visión detallada sobre la influencia de la anestesia en la función cerebral de primates no

humanos (NHPs). El uso de la resonancia magnética funcional (fMRI) en NHPs anestesiados es crucial para comprender mejor las enfermedades neurológicas y para el desarrollo de tratamientos más efectivos.

El objetivo principal de este estudio es analizar los efectos de la anestesia en el flujo sanguíneo cerebral y la conectividad funcional en NHPs, con el fin de proporcionar información relevante para el diseño experimental y la interpretación de datos en estudios de neurociencia que utilizan modelos de NHPs.

El estudio reveló que la anestesia afecta significativamente el flujo sanguíneo cerebral, la conectividad funcional y la actividad neuronal en los NHPs. Se observaron similitudes en la conectividad funcional entre el cerebro anestesiado de NHPs y el cerebro humano, lo que sugiere la relevancia de los modelos de NHPs en la investigación traslacional de enfermedades neurológicas.

Un estudio «***Effect of Attentional Bias on the 3D Rotated Objects Recognition Ability of Dogs***» por Siniscalchi et al., (2023) se enfocó en evaluar las habilidades cognitivas de los perros en lo que respecta al reconocimiento de objetos tridimensionales rotados. La investigación se realizó en la Universidad de Bari, utilizando tanto estímulos reales como digitales para evaluar la capacidad de los perros para reconocer y discriminar objetos en diferentes contextos.

El objetivo de este estudio fue investigar el efecto del sesgo atencional en la capacidad de los perros para reconocer objetos tridimensionales rotados. Se buscó comprender cómo las diferencias individuales en el sesgo atencional podrían influir en la capacidad de los perros para realizar tareas de discriminación visual.

El estudio reveló que el sesgo atencional puede influir en la capacidad de los perros para reconocer objetos tridimensionales rotados. Se observaron diferencias individuales en el sesgo atencional y su impacto en la capacidad de los perros para completar tareas de discriminación visual. Esto tiene implicaciones significativas para comprender las habilidades cognitivas de los perros y podría ser relevantes para el entrenamiento y la modificación del comportamiento.

2.1. PROBLEMÁTICA

En el contexto neurológico canino, existe la incapacidad de observar directamente las respuestas cerebrales de los perros al recibir comandos. La falta de una herramienta dedicada para la monitorización y el análisis de las señales cerebrales de manera clara y en tiempo real limita la comprensión de los procesos mentales y emocionales que subyacen al comportamiento canino. Esto dificulta la identificación de patrones específicos de actividad cerebral asociados con el aprendizaje, la motivación y la respuesta a estímulos externos, lo que a su vez obstaculiza el desarrollo de nuevas técnicas de entrenamiento más efectivas y éticas.

La importancia de tener perros entrenados y de desarrollar nuevas técnicas de entrenamiento radica en diferentes aspectos clave. En primer lugar, los perros entrenados pueden desempeñar roles vitales en una variedad de campos, incluidos la asistencia médica, la búsqueda y rescate, la detección de drogas y explosivos, y la terapia emocional, entre otros. Además, el entrenamiento adecuado mejora significativamente la calidad de vida de los perros al proporcionarles estímulos mentales y físicos, fortalecer el vínculo con sus dueños y ayudarles a integrarse mejor en la sociedad humana.

Un estudio realizado por (Petry et al., 2015) llamado «**Perceptions about professionally and non-professionally trained hypoglycemia detection dogs**» según Petry, la importancia del entrenamiento en perros para detectar niveles de glucosa es significativa. Los propietarios de perros entrenados profesionalmente o por sí mismos reportaron percepciones positivas sobre la capacidad de los perros para alertar sobre niveles bajos y altos de glucosa. Además, durante los períodos de propiedad de perros, se observó una mejora en la gestión de la diabetes, con reducciones en hospitalizaciones relacionadas con la diabetes, la necesidad de asistencia de otras personas para tratar la hipoglucemia, y los accidentes o casi accidentes mientras se conducía. Los resultados sugieren que el entrenamiento de los perros para detectar glucosa puede tener un impacto positivo en la vida de las personas con diabetes.

El objetivo principal del estudio fue evaluar las percepciones de los propietarios de perros entrenados para detectar niveles de glucosa, tanto aquellos entrenados

profesionalmente como por los propios dueños, y comparar la utilidad de estos perros en la gestión de la diabetes.

Los resultados del estudio revelaron que tanto los perros entrenados profesionalmente como aquellos entrenados por los propios dueños fueron percibidos positivamente en términos de su capacidad para alertar sobre niveles bajos y altos de glucosa, y se observó una mejora en la gestión de la diabetes durante los períodos de propiedad de perros.

La comprensión más profunda de cómo aprenden los perros, cómo procesan los comandos y cómo responden a diferentes estímulos permite a los entrenadores adaptar sus métodos para satisfacer las necesidades individuales de cada perro y maximizar los resultados. Esto pudo conducir a una mayor rapidez y consistencia en el entrenamiento, así como a una reducción del estrés y la frustración tanto para los perros como para sus dueños.

La problemática en este estudio radica en la necesidad de una herramienta que permita visualizar y analizar las señales de EEG en perros durante el entrenamiento, con el fin de mejorar la comprensión de las respuestas cerebrales de los perros y avanzar en el desarrollo de técnicas de entrenamiento más efectivas y humanas. La falta de una herramienta asequible limita el progreso en este campo y representa un obstáculo significativo para el bienestar y el rendimiento de los perros entrenados en diversas áreas de aplicación.

2.2. IMAGEN INTEGRADORA

En América Latina, se ha evidenciado una marcada carencia de acceso a tecnologías en el ámbito de la neurociencia veterinaria, específicamente en canes. En países como Honduras, esta situación se agudiza aún más, donde la falta de desarrollo de herramientas tecnológicas avanzadas, como la Inteligencia Artificial, es palpable.

Un aspecto particularmente relevante es la falta de dispositivos asequibles capaces de medir las ondas cerebrales en animales, como los perros, al recibir comandos. Esta herramienta sería fundamental para estudiar nuevas técnicas de entrenamiento, permitiendo observar las reacciones cerebrales tanto en perros entrenados como no entrenados.

Para abordar esta necesidad, se propuso la creación de un dispositivo utilizando componentes accesibles como Arduino y el chip Neurosky del juguete Mindflex. Este dispositivo tendría la capacidad de medir las señales cerebrales de los perros mientras se les dan comandos, abriendo así nuevas posibilidades en el campo del entrenamiento animal. Con esta innovación, se podría avanzar significativamente en la comprensión de los procesos cognitivos de los perros y mejorar las técnicas de adiestramiento de manera más precisa, ética y efectiva (Ilustración 1).

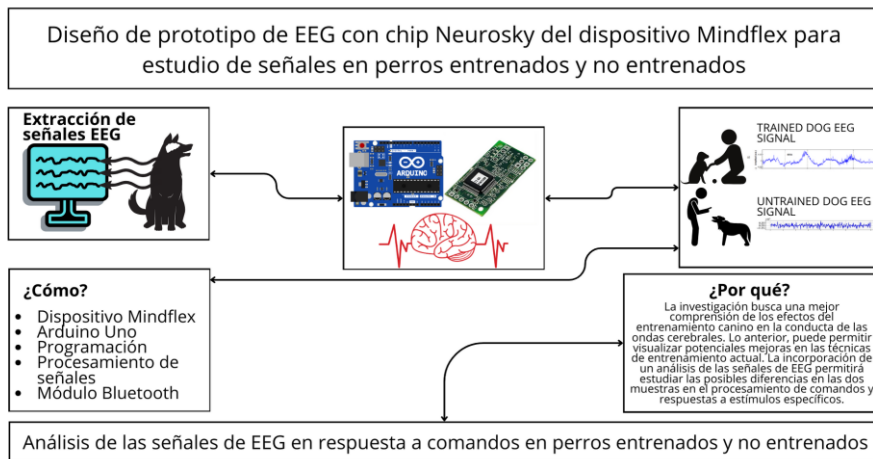


Ilustración 1. Imagen Integradora

Fuente: Elaboración Propia

2.3. LIMITACIONES

Tabla 1. Limitantes de Estudios Pasados

Artículo	Autores	País	Enfoque del estudio	Tipo de Limitación	Detalle de Limitaciones
Testing the Accuracy of Wearable Technology to Assess Sleep Behaviour in Domestic Dogs: A Prospective Tool for Animal Welfare Assessment in Kennels	Ivana Gabriela Schork, Isabele Aparecida Manzo, Marcos Roberto Beiral de Oliveira, Fernanda Vieira Costa, Robert John Young, Cristiano Schetini De Azevedo (2023)	Brasil	Evaluar la precisión de un dispositivo “ponible” (wearable) dedicado a estudiar el comportamiento del sueño en perros domésticos.	Los datos obtenidos por el collar difieren a las observaciones conductuales en los perros.	Se identificó una diferencia significativa entre los datos que fueron recopilados por el collar y lo que reportaban los observadores conductuales con diferencias que se encuentran entre el 18% y 25%.
Electroencephalogram and Physiological Responses as Affected by Slaughter Empathy in Goats	Pavan Kumar, Ahmed Abubakar Abubakar, Muideen Adewale Ahmed, Muhammad Nizam Hayat ,Mokrish Ajat, Ubedullah Kaka, Yong Meng Goh, Awis Qurni Sazili (2023)	Malasia	Evaluar el impacto que tiene el estrés emocional en las cabras durante el sacrificio para ver como este afecta sus respuestas emocionales y fisiológicas.	Tamaño de muestra limitado	Los investigadores encontraron que el tamaño de su muestra era muy pequeño por lo cual recomiendan realizar un estudio como este pero con una mayor muestra.

Tabla 1. Continuación

Artículo	Autores	País	Enfoque del estudio	Tipo de Limitación	Detalle de Limitaciones
Perioperative Brain Function Monitoring with Electroencephalography in Horses Anesthetized with Multimodal Balanced Anesthetic Protocol Subjected to Surgeries	Carla Murillo, Hsin-Yi Weng, Ann B. Weil, Matthias Kreuzer and Jeff C. Ko (2022)	Estados Unidos	Evaluar el uso del EEG para detectar cambios en la actividad cerebral en caballos anestesiados.	Tamaño de muestra limitado	Se identificó que el tener un estudio como este con una muestra más grande permitiría generalizar los resultados obtenidos.
Comparative Study of Pain-Related Responses of Male Piglets up to Seven Days of Age to the Application of Different Local Anaesthetics and Subsequent Castration	Franz Josef Söbbeler, Sören Wendt, Andreas Briese, Julia Tünsmeier, Karl-Heinz Waldmann, Sabine Beate Rita Kästner, Alexandra von Altroc (2022)	Alemania	Realizar una evaluación comparativa a la respuesta del dolor durante la castración de lechones bajo el efecto de diferentes anestésicos.	Dificultad al estandarizar las condiciones.	Los investigadores identificaron una dificultad al momento de mantener los lechones en las mismas condiciones durante el estudio para evitar variables que pudieran afectar los resultados.

Tabla 1. Continuación

Artículo	Autores	País	Enfoque del estudio	Tipo de Limitación	Detalle de Limitaciones
Estimating the Frequencies of Maximal Theta-Gamma Coupling in EEG during the N-Back Task: Sensitivity to Methodology and Temporal Instability	Dmitry O. Sinitsyn, Alexandra G. Poydasheva, Ilya S. Bakulin, Alfiia H. Zabirova, Dmitry Yu. Lagoda, Natalia A. Suponeva, Michael A. Piradov (2023)	Rusia	Medir la relación entre las ondas cerebrales teta y gamma al realizar una tarea específica	Los resultados pueden no-aplicar a otras tareas cognitivas	Se analizaron las ondas cerebrales durante una tarea específica llamada "N-back". Los investigadores recomiendan más investigaciones para determinar si los resultados aplican a otras tareas cognitivas
Improving Behavior Monitoring of Free-Moving Dairy Cows Using Noninvasive Wireless EEG Approach and Digital Signal Processing Techniques	Ana Carolina de Sousa Silva, Aldo Ivan Céspedes Arce, Hubert Arteaga ,Valeria Cristina Rodrigues Sarnighausen, Gustavo Voltani von Atzingen, Ernane José Xavier Costa (2023)	Brasil	Desarrollar un método no-invasivo para monitorear las ondas cerebrales en vacas para permitir su libre movimiento.	Artefactos en las señales obtenidas	Los investigadores encontraron artefactos tanto de interferencia interna como de externa debido a la dificultad del proceso de capturar estas señales.

Tabla 1. Continuación

Artículo	Autores	País	Enfoque del estudio	Tipo de Limitación	Detalle de Limitaciones
The Potential of Bemegrade as an Activation Agent in Electroencephalography in Dogs	Junya Hirashima, Miyoko Saito, Minoru Yokomori	Japón	Determinar si el fármaco Bemegrade funciona como agente de activación de encefalografía en perros.	Falta de información acerca de la dosis	Existen estudios limitados referentes a la dosis adecuada de este medicamento en perros. Es necesario identificar la dosis adecuada para obtener mejores resultados
The role of trained and untrained dogs in the detection and warning of seizures	Grace C. Luff, Ilaria Belluomo, Eleonora Lugarà, Matthew C. Walker (2023)	Reino Unido	Recopilar y revisar la literatura existente en cuanto al uso de perros para la detección de convulsiones.	Falta de estudios	Existe un número limitado de estudios controlados que demuestren la efectividad del uso de perros para la detección de convulsiones lo cual dificulta la estandarización del proceso

Tabla 1. Continuación

Artículo	Autores	País	Enfoque del estudio	Tipo de Limitación	Detalle de Limitaciones
Effects of Anesthesia on Cerebral Blood Flow and Functional Connectivity of Nonhuman Primates	Xiaodong Zhang (2022)		Medir el impacto de la anestesia en primates no humanos y el impacto que tiene en la función cerebral.	Supresión de la señal fMRI	La mayoría de los anestésicos utilizados suprimen las señales del fMRI.
Effect of Attentional Bias on the 3D Rotated Objects Recognition Ability of Dogs	Marcello Siniscalchi, Serenella d'Ingeo Angelo Quaranta (2023)		Investigar la capacidad de los perros para reconocer imágenes tridimensionales y determinar que tanto involucran su cerebro en esto	Variabilidad individual de los perros	Muchos factores como el tiempo de reacción y el índice de lateralidad variaban significativamente entre cada perro por lo cual se dificulta la interpretación de los resultados.

Tabla 1. Continuación

Artículo	Autores	País	Enfoque del estudio	Tipo de Limitación	Detalle de Limitaciones
Differences in dogs' event-related potentials in response to human and dog vocal stimuli; a non-invasive study.	Anna Bálint, Huba Eleőd, Lilla Magyari, Anna Kis y Márta Gácsi. (2022)	Hungría	Investigar cómo los perros procesan y responden a los estímulos vocales de humanos y perros, utilizando medidas de potenciales relacionados con eventos (ERP).	Limitaciones metodológicas y técnicas en el diseño y ejecución del estudio	El número reducido de electrodos utilizados, lo que puede haber afectado la precisión de la localización de las respuestas neuronales.

Fuente: Elaboración Propia

III. OBJETIVOS

En el capítulo a continuación se definieron los objetivos clave para la planeación del proyecto de investigación.

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un prototipo de electroencefalograma (EEG) utilizando el chip Neurosky del dispositivo Mindflex para el estudio de señales en perros entrenados y no entrenados.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer estudios previos científicos en relación con el procesamiento de señales electroencefalográficas (EEG) en animales, herramientas, materiales y métodos utilizados.
- Elaborar un diseño aplicable en relación a la programación y montaje de conexiones del Arduino UNO como medio de comunicación para visualizar las señales cerebrales.
- Fabricar un prototipo utilizando el chip Neurosky del dispositivo Mindflex con el fin de que sea una opción asequible para entrenadores y dueños que entrenan a sus perros, buscando analizar las respuestas de las señales visualizando por medio de EEG.
- Obtener las señales cerebrales de dos perros entrenados y dos perros no entrenados utilizando el prototipo después de realizar comandos de entrenamiento, haciendo uso de análisis estadísticos en Minitab comparando las respuestas en los cuatro sujetos de prueba.

IV. MÉTODOS

El presente estudio se enmarcó dentro de un enfoque metodológico cuantitativo, con el propósito de realizar la investigación de manera sistemática y objetiva los aspectos relacionados con el tema de estudio. Este estudio se definió con un diseño experimental debido a la naturaleza del objeto de investigación, que involucra la lectura, medición y análisis de variables específicas en un entorno controlado (Tabla 2). En este caso, se emplearon cuatro sujetos de estudio, todos ellos caninos, garantizando un enfoque más detallado en el comportamiento animal. De igual manera, se planteó el estudio como un trabajo transversal, permitiendo la adquisición de datos en un momento específico del tiempo, brindando así un análisis preciso de las relaciones y aspectos en el contexto del entrenamiento canino.

Tabla 2. Objetivo del Método

Metodología del estudio	
Enfoque	Cuantitativo
Tipo de estudio	Transversal
Tipo de diseño	Experimental
Técnicas e instrumentos	Procesamiento de señales con software / Análisis estadístico / Arduino Uno

Fuente: Elaboración Propia

4.1. OBJETIVO DEL MÉTODO

Tabla 3. Objetivo del Método

Método	Objetivo	Instrumento o técnica
Adquisición de señales	Adquirir señales cerebrales en un estudio de prototipo de dispositivo para perros es un paso importante para validar el dispositivo y evaluar su rendimiento.	Chip Neurosky del Dispositivo Mindflex
Procesamiento de señales en canes	Remover artefactos, filtrar ruido e interferencias en el procesamiento de las señales para una lectura exitosa de las mismas.	Software Python
Recopilación de datos	Aplicar el Arduino UNO como método de recopilación de datos y almacenamiento de las señales electroencefalograficas (EEG) en canes, de esta manera permitiendo una captura de los datos con más precisión en las señales cerebrales en perros entrenados y no entrenados.	Arduino UNO

Tabla 3. Continuación

Método	Objetivo	Técnica o Instrumento
Análisis estadístico	Elaborar un análisis estadístico para la validación del funcionamiento y rendimiento del chip Neurosky en el dispositivo Mindflex	Minitab

Fuente: Elaboración Propia

4.2. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Con el propósito de elaboración del proyecto de investigación, se definieron las variables dependientes e independientes del estudio que están relacionadas entre sí (Ilustración 2).

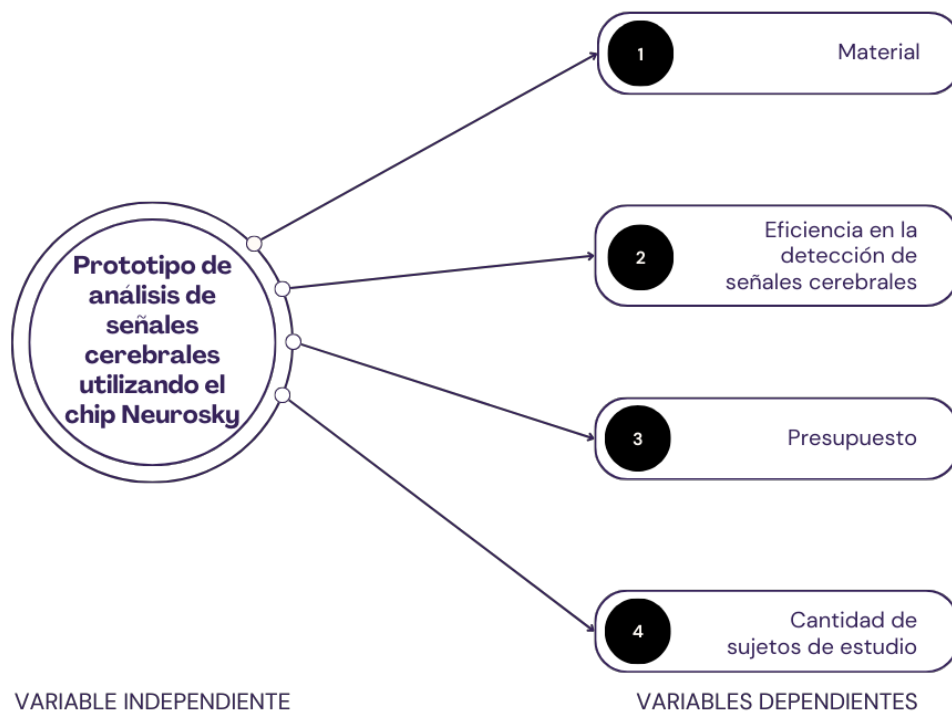


Ilustración 2. Variable dependiente y variables independientes

Fuente: Elaboración Propia

4.2.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

El proyecto se enfocó en una sola variable independiente, siendo esta el prototipo de análisis de las señales cerebrales utilizando el chip Neurosky, las mismas son un indicador fundamental en el estudio de entrenamiento canino, enfocándose principalmente en las registradas a través de electroencefalografía (EEG), al recibir comandos. La importancia de esta variable radicó en el comportamiento de los perros durante el entrenamiento, ya que proporciona información directa sobre la actividad cerebral en respuesta a los estímulos verbales o gestuales proporcionados por el

entrenador o dueño. Al estudiar la misma, se pudieron identificar patrones entre la actividad cerebral y las respuestas conductuales de los canes.

4.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES

- Material: Se tuvo que analizar qué materiales, métodos y herramientas eran necesarios y adecuados para la elaboración del prototipo para el análisis de señales de EEG utilizando el chip Neurosky del dispositivo recreativo Mindflex, tomando en cuenta los costos.
- Eficiencia en la detección de las señales cerebrales: Una detección eficiente de las señales de EEG garantiza una recolección de datos precisa, de esta manera facilita una interpretación más precisa de la actividad cerebral en los canes en respuesta a los comandos.
- Presupuesto: Con el fin de crear un prototipo asequible para todas las personas interesadas en el análisis de señales electroencefalográficas de los perros para optimización de su entrenamiento.
- Cantidad de sujetos de estudio: Una muestra adecuada permite una representación más precisa de la población del estudio, aumenta la fiabilidad y validez de los resultados estadísticos del estudio. Con la generalización de los resultados, es más probable que los resultados obtenidos puedan generalizar a la población canina en un conjunto.

4.3 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

A continuación, se visualiza la operacionalización de las variables (Tabla 4), se especifica la definición conceptual, dimensiones e indicadores en relación con los objetivos y variables del estudio.

Tabla 4. Operacionalización de las variables

Objetivos	Variabes	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
General	Independiente	El análisis de las señales cerebrales en perros a través del prototipo de EEG basado en el chip Neurosky del dispositivo Mindflex, con el objetivo de comprender y estudiar las respuestas cerebrales en diferentes situaciones y contextos.	Efectividad del prototipo, comportamiento canino	Precision del EEG, correlación de los datos obtenidos con el comportamiento
Desarrollar un prototipo de electroencefalograma (EEG) utilizando el chip Neurosky del dispositivo Mindflex para el estudio de señales en perros entrenados y no entrenados.	Las señales cerebrales			
Específicos	Dependientes	La revisión y reconocimiento de estudios científicos previos relacionados con el procesamiento de señales EEG ayuda a comprender la base científica existente y los enfoques metodológicos empleados en la investigación del EEG en animales.	Metodología utilizada, herramientas y materiales utilizados, relevancia científica de los estudios.	Numero de citas, tecnologías utilizadas
Reconocer estudios previos científicos en relación con el procesamiento de señales electroencefalográficas (EEG) en animales, herramientas, materiales y métodos utilizados.	Material			

Tabla 4. Continuación

Específicos	Dependientes	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Elaborar un diseño aplicable en relación a la programación y montaje de conexiones del Arduino UNO como medio de comunicación para visualizar las señales cerebrales.	Eficiencia en la detección de las señales cerebrales	Desarrollar un sistema eficiente que permita la detección y visualización efectiva de las señales cerebrales mediante la programación adecuada y el montaje de conexiones del Arduino UNO.	Programación, usabilidad, estabilidad de las conexiones	Eficiencia del código, facilidad de uso, visualización de las señales.
Fabricar un prototipo utilizando el chip Neurosky del dispositivo Mindflex con el fin de que sea una opción asequible para entrenadores y dueños que entrenan a sus perros, buscando analizar las respuestas de las señales visualizando por medio de EEG.	Presupuesto	Ofrecer una solución rentable que permita la visualización de las respuestas cerebrales de los perros durante el entrenamiento.	Costo, accesibilidad, disponibilidad de los componentes, rendimiento del dispositivo	Presupuesto, vida útil del dispositivo, eficiencia
Obtener las señales cerebrales de dos perros entrenados y dos perros no entrenados utilizando el prototipo después de realizar comandos de entrenamiento, haciendo uso de análisis estadísticos en Minitab comparando las respuestas en los cuatro sujetos de prueba.	Cantidad de sujetos de estudio	Evaluar las diferencias en las respuestas cerebrales entre perros entrenados y no entrenados durante situaciones específicas de entrenamiento.	Consistencia de los resultados, diferencias entre los grupos, impacto de los comandos	Análisis estadístico, validación de datos, resultados antes y después de realizar los comandos

Fuente: Elaboración Propia

4.4. RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

En esta sección se detalla el procedimiento utilizado para llevar a cabo la investigación, que tuvo como objetivo principal el desarrollo de un prototipo para el registro y análisis de señales de EEG en perros durante sesiones de entrenamiento. El propósito de este prototipo fue proporcionar una herramienta que permita el estudio del comportamiento de los canes y, de esta manera, explorar nuevas líneas de entrenamiento basadas en la observación de las señales de EEG en respuesta a los comandos.

La metodología aplicada fue un enfoque cuantitativo, así, centrándose en la adquisición y cuantificación de las señales cerebrales en los perros mientras interactuaron con sus entrenadores. Se realizaron análisis para identificar patrones en las señales de EEG asociadas a diferentes estímulos y respuestas durante el proceso de adiestramiento.

Por otro lado, el alcance de esta investigación se enmarcó en un diseño experimental. La implementación de este prototipo para la detección y análisis de las señales implicó la utilización de un dispositivo compuesto por un Arduino UNO, un chip Neurosky del dispositivo Mindflex, adaptado específicamente para la medición de las ondas cerebrales caninas en respuesta a comandos verbales y gestuales. Durante las pruebas se registraron las señales EEG de cuatro sujetos caninos mientras recibían instrucciones por parte de los entrenadores. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de procesamiento de datos que incluyó la filtración de ruido, segmentación de las señales relevantes y el análisis estadístico, por medio de Minitab, de los patrones de actividad cerebral observados.

4.4.1. MATERIALES

En esta sección se definieron los materiales que fueron seleccionados para el desarrollo del proyecto de investigación.

- Mindflex

El dispositivo Mindflex de Neurosky es un dispositivo de entretenimiento que utiliza sensores de ondas cerebrales para que la medición de actividad eléctrica sea

posible, así, convertirlas en señales que pueden emplearse para la interacción con dispositivos electrónicos (NeuroSky, s/f). Siendo esta una opción más asequible para la lectura de señales de EEG.

- Arduino Uno R3 ATMEGA328

El Arduino Uno R3 ATmega328 es una placa de desarrollo de hardware de código abierto que se basa en el microcontrolador ATmega328 de Atmel. Contó con 14 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 6 pueden usarse como salidas de modulación de ancho de pulso (PWM), y 6 pines analógicos que pueden utilizarse como entradas analógicas. La placa pudo conectarse a través de un cable USB a una computadora, lo que permitió cargar programas y datos, así como también alimentar la placa.

- Módulo Bluetooth HC-05

El módulo Bluetooth HC-05 es un dispositivo que permitió establecer una conexión inalámbrica, con el fin de obtener conexiones seriales entre dispositivos electrónicos. El módulo pudo ser alimentado en voltajes de 3.3V a 6V, lo que esto lo hace compatible con una gran variedad de sistemas y microcontroladores.

- Booster DC MT3608

El Booster DC-DC MT3608 es un módulo convertidor de voltaje utilizado en proyectos electrónicos donde se requiere elevar el voltaje de entrada a un nivel más alto de manera eficiente. Este módulo fue basado en el chip elevador de voltaje MT3608, este permitió convertir una entrada de voltaje más abajo en una salida de voltaje más alto.

1.2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La metodología aplicada para el proyecto de investigación se basó en el Modelo en V (Ilustración 3), seleccionando por su estructura sistemática para guiar el desarrollo del prototipo de análisis de señales cerebrales en perros durante su adiestramiento. El objetivo final era lograr el desarrollo efectivo del prototipo, permitiendo así estudiar el comportamiento de los durante el entrenamiento a través del registro y el análisis de las señales cerebrales obtenidas.

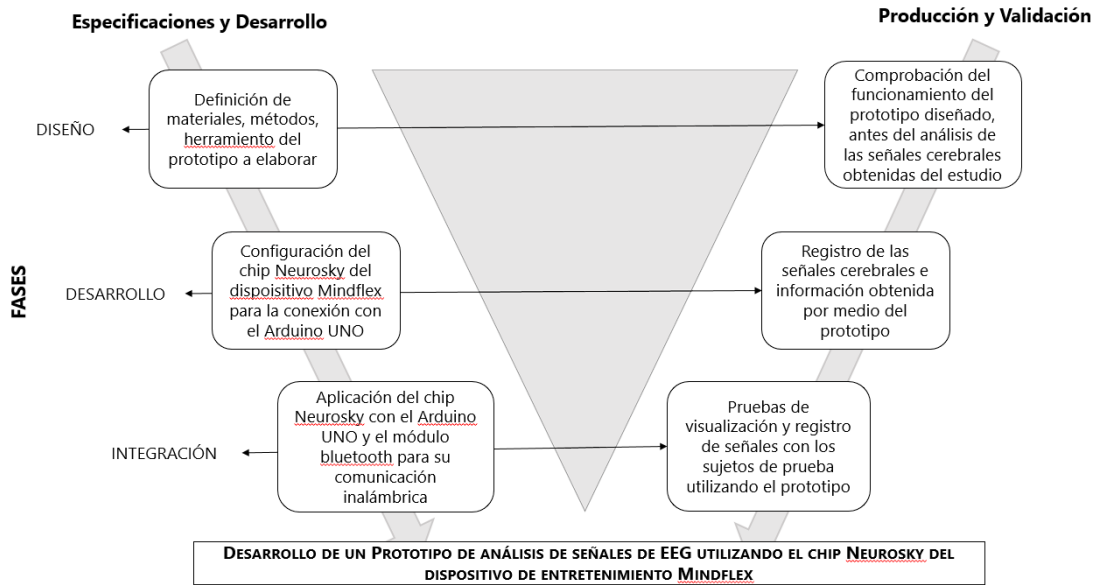


Ilustración 3. Metodología en V

Fuente: Elaboración Propia

4.5.1. FASE DE DISEÑO

Seleccionar previamente los materiales y componentes para el desarrollo del prototipo fue relevante para determinar la capacidad de adquisición y funcionamiento del sistema, también influyó en la compatibilidad y precisión. La adecuación de los materiales garantizó una integración más limpia, lo que facilitó la captura de las señales necesarias para su procesamiento y estudio.

4.5.2. FASE DE DESARROLLO

Como parte de la fase de desarrollo, se tuvo que configurar el chip Neurosky, parte del dispositivo Mindflex para el desarrollo del prototipo para el análisis de señales cerebrales en canes. Establecer la comunicación serial entre el dispositivo Mindflex y el microcontrolador Arduino Uno permitió la adquisición de las señales cerebrales necesarias para realizar el estudio.

4.5.3. FASE DE INTEGRACIÓN

La programación del Arduino IDE desempeñó una parte importante en la integración y funcionamiento en conjunto con los demás componentes del prototipo para el análisis de las señales. Esta programación posibilitó una comunicación efectiva

con el chip Neurosky, el Módulo Bluetooth y el Arduino Uno, hizo posible la interpretación de las señales capturadas y su traducción en comandos comprensibles para el control del sistema durante el entrenamiento canino.

4.6. IMAGEN DEL PROCESO

En el siguiente apartado, se define el proceso metodológico del proyecto de investigación.

En la primera etapa del estudio (Ilustración 4), se observó tanto el ensamblaje como la configuración del dispositivo Mindflex de la mano con el microcontrolador de Arduino Uno. El objetivo principal de esta etapa se basó en permitir evaluar y validar el funcionamiento óptimo del prototipo, realizando ajustes en el mismo para un mejor desempeño. El registro de señales cerebrales de los canes por medio del dispositivo Mindflex para su procesamiento y análisis comparativo.

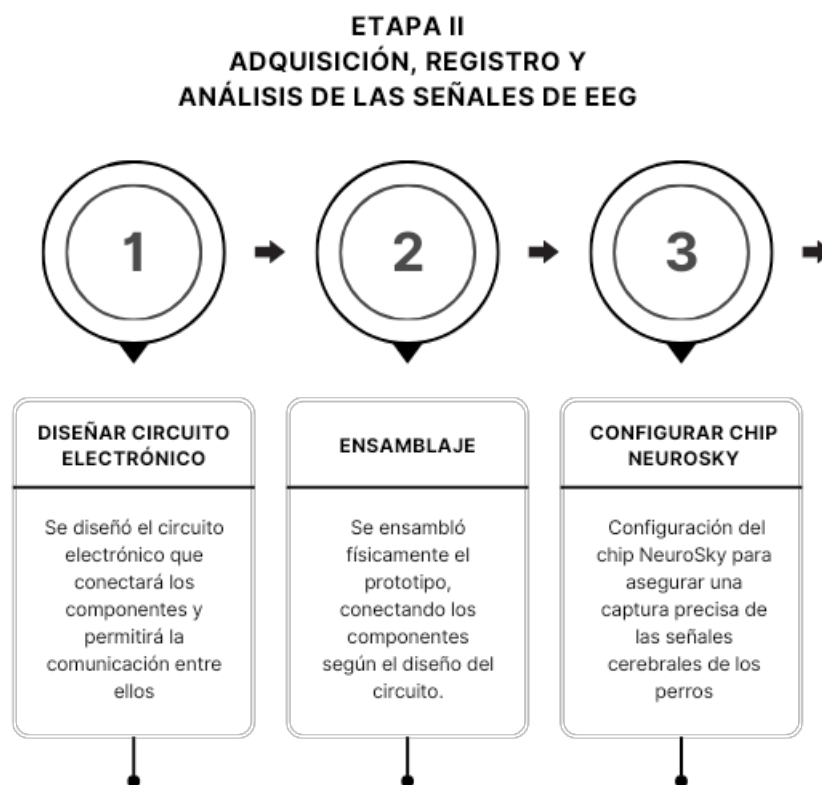


Ilustración 4. Etapa I. Ensamblaje Y Validación Del Prototipo

Fuente: Elaboración Propia

En la etapa 2 del procedimiento del prototipo (Ilustración 5), se llevó a cabo el registro y procesamiento de las ondas cerebrales caninas. Dentro de esta etapa hubo una fase de prueba previa al procesamiento de las señales de EEG relevantes.

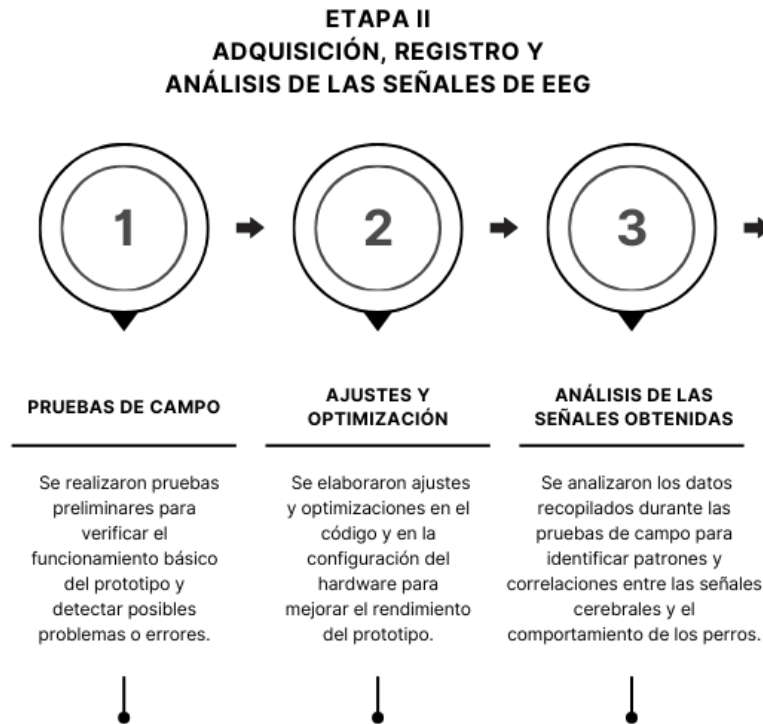


Ilustración 5. Etapa II. Adquisición, registro y validación de las señales de EEG

Fuente: Elaboración Propia

En la tercera y última etapa (Ilustración 6), se pudieron evaluar pruebas de campo, ajustes y optimización del código para una más fácil toma de los datos, y así, se pudo analizar las señales obtenidas durante el proceso de adiestramiento, pudiendo visualizar cambios en la frecuencia y forma de las ondas cerebrales.

**ETAPA III
ANÁLISIS DE DATOS DE LAS
SEÑALES CEREBRALES EN CANES**



Ilustración 6. Análisis de datos de las señales cerebrales caninas

Fuente: Elaboración Propia

4.7. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN

En el siguiente apartado, se llevaron a cabo distintas pruebas y métodos de análisis para poder asegurar el funcionamiento y la precisión del dispositivo. El enfoque metodológico aplicado a estos métodos de análisis fue basado en poder aplicar métricas de evaluación objetivas para evitar sesgos en los resultados y conclusiones obtenidas.

4.7.1. TIEMPO DE REGISTRO DE LAS SEÑALES

Un tiempo de registro de las señales bajo indicó que el dispositivo contó con una mayor eficiencia. Esto fue un aspecto crucial para que el monitoreo de las señales cerebrales durante el entrenamiento fuese efectivo.

4.7.2. CALIDAD DE LAS SEÑALES

Para poder obtener resultados precisos, se debió asegurar que existiera poca o ninguna presencia de artefactos para asegurar la coherencia de las ondas registradas.

4.7.3. CALIDAD DEL CÓDIGO

La calidad del código en C/C++ del Arduino Uno influyó la capacidad del dispositivo de medir, registrar y almacenar los datos obtenido durante el entrenamiento de los perros. Es importante saber optimizar el código de la mejor manera aprovechando las capacidades de memoria y procesamiento del microcontrolador para maximizar el tiempo de respuesta del dispositivo.

4.7.4. CARACTERÍSTICAS DEL ADIESTRAMIENTO ENTREGADO A LOS CANES

El tiempo de entrenamiento en un perro y la consistencia del entrenamiento pueden influir en su capacidad para responder a los comandos y mantener el enfoque durante las sesiones de entrenamiento. Los perros con más experiencia de entrenamiento pueden mostrar respuestas cerebrales más consistentes y predecibles.

La edad del can durante el adiestramiento fue un factor muy importante, los perros entrenados desde cachorros pueden tener una mayor adaptabilidad cerebral, lo que puede reflejarse en patrones cerebrales distintivos durante el entrenamiento.

De igual manera, el estímulo y recompensa son herramientas importantes en el proceso de adiestramiento, el perro debe sentirse cómodo hacia el entrenamiento desde el inicio del mismo. Al asociar los comandos con una recompensa, como comida, juguetes o elogios se aumenta la atención del perro durante las sesiones.

En cuanto al entorno o el ambiente en el que se estén desarrollando las prácticas se estableció uno libre de distracciones, buscando la seguridad y comodidad del can. Los perros que están altamente sobre estimulados y expuestos a una variedad de estímulos al mismo tiempo, como ruidos fuertes, olores intensos, movimientos rápidos o multitudes de personas o perros, puede afectar la calidad del procesamiento de la información.

4.7.5. TIEMPO DE RESPUESTA DEL PROTOTIPO

El tiempo de respuesta se refiere a la capacidad del dispositivo de dar una respuesta o tomar una decisión una vez que la señal cerebral ha sido detectada. Así como

el tiempo de registro de la señal, es importante que el dispositivo pueda procesar y enviar estos datos obtenidos de manera funcional para mantener la precisión de los resultados.

V. RESULTADOS

En el apartado de resultados, se visualizan las características clave y descubrimientos obtenidos durante el desarrollo del prototipo de EEG para el análisis de actividad cerebral durante el entrenamiento en canes. El dispositivo se diseñó específicamente para la monitorización de la actividad electroencefalográfica en sujetos caninos, sometiéndose también a pruebas y validación en el funcionamiento.

5.1. DEFINICIÓN DE MATERIALES, MÉTODOS, HERRAMIENTAS DEL PROTOTIPO

En esta sección se especificaron los materiales y componentes que fueron de utilidad para la elaboración del prototipo de EEG para canes con el chip Neurosky del dispositivo Mindflex, incluyendo las especificaciones técnicas de cada componente.

5.1.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DE LOS COMPONENTES

En la siguiente sección se detalló el proceso en cuanto a la elección de los componentes necesarios para el desarrollo del prototipo de EEG para perros. Se tomaron en cuenta elementos fundamentales como el costo, disponibilidad localmente, adecuación de los componentes entre sí, y su capacidad para un desempeño inalámbrico estable (Ilustración 7).

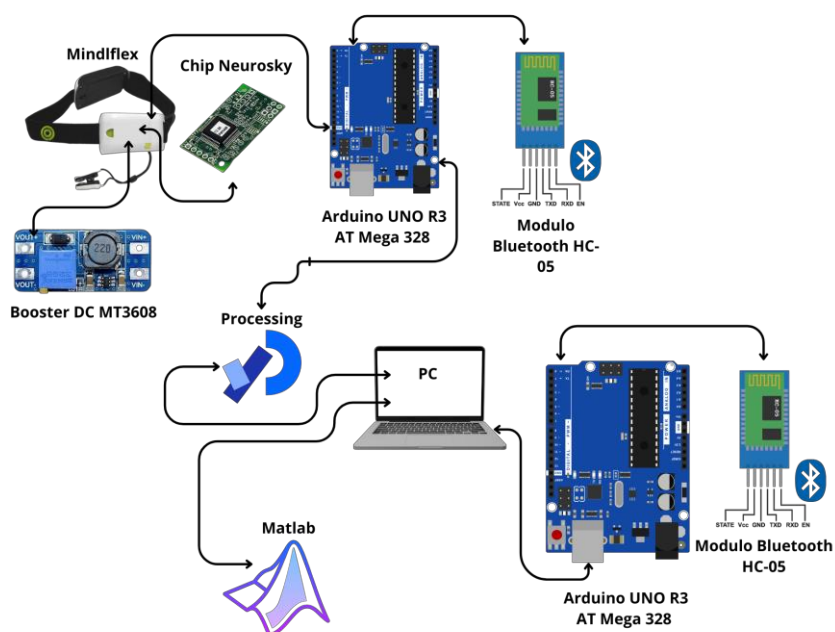


Ilustración 7. Diseño del sistema

Fuente: Elaboración Propia

5.1.1.1. *Arduino Uno R3 ATmega328*

El Arduino Uno R3 ATmega328 fue seleccionado como la plataforma principal para el desarrollo del prototipo del EEG canino debido a sus beneficios, como su facilidad de uso, versatilidad y amplia disponibilidad de recursos para su desarrollo. Además, se consideró su costo asequible y la capacidad de personalización, siendo esta una solución ideal para este proyecto. La comunidad y el amplio soporte en línea también fueron factores determinantes, haciendo posible el acceso a una gran cantidad de conocimiento y experiencias compartidas que facilitan el desarrollo y resolución de problemas durante el proceso de diseño del prototipo.

Tabla 5. Especificaciones técnicas Arduino Uno ATmega328

Característica	Especificaciones
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de Operación	5V
Voltaje de Entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines de E/S digitales	14 (6 son salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC por Pin de E/S	20mA
Corriente DC para Pin de 3.3V	50mA
Memoria Flash	32KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Velocidad del reloj	16MHz
Longitud	68.6mm
Ancho	53.4mm
Peso	25g

Fuente: Elaboración Propia

Se optó por utilizar dos Arduino Uno R3 ATmega328 para crear un prototipo inalámbrico, basándose en la necesidad de establecer una comunicación sin cables entre el dispositivo Mindflex y el sistema de procesamiento de datos en la computadora (Ilustración 8). El primer Arduino Uno, conectado a la computadora, actúa como "master"

o receptor de datos a través de un módulo Bluetooth HC-05, que recibe las señales del segundo Arduino Uno. Este segundo Arduino Uno, equipado con otro módulo Bluetooth HC-05, se integra en el headset del dispositivo Mindflex para capturar las señales cerebrales del perro. La decisión de esta configuración inalámbrica permite una mayor movilidad y libertad durante el entrenamiento de los sujetos de prueba, evitando la necesidad de cables que podrían interferir en el movimiento del animal y dificultar el proceso de captura de datos. Además, al utilizar dos Arduinos Uno separados, se logra una mayor flexibilidad en el diseño del prototipo, facilitando la implementación y mantenimiento del sistema inalámbrico. También, permitiendo una fácil escalabilidad del prototipo, lo que significa que se pueden agregar o modificar futuros componentes según sea necesario en próximas iteraciones del proyecto.

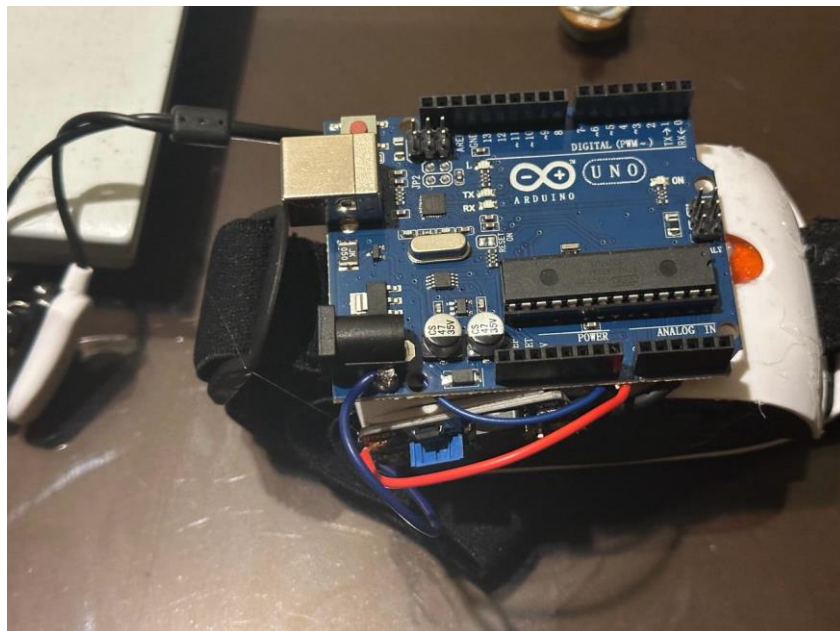


Ilustración 8. Arduino Uno ATmega328 en el dispositivo Mindflex

Fuente: Elaboración Propia

5.1.1.2. *Módulo Bluetooth HC-05*

Los dos módulos Bluetooth HC-05 utilizados en el prototipo ofrecieron una conectividad inalámbrica confiable y estable, lo que permitió la eliminación de cables y proporcionó un entrenamiento más eficiente en los sujetos de prueba. Su compatibilidad universal garantizó una integración sencilla con los Arduinos Uno utilizados y el envío de datos a la computadora, independientemente de la plataforma utilizada. Así mismo, la facilidad de configuración de los módulos Bluetooth HC-05 simplificó el proceso de

desarrollo y redujo el tiempo de implementación del prototipo. Su costo asequible permitió mantener los costos del prototipo dentro del presupuesto.

Tabla 6. Especificaciones técnicas del módulo Bluetooth HC-05

Características	Especificaciones
Versión del Bluetooth	V2.0 + EDR (Enhanced Data Rate)
Rango de comunicación	Aprox. 10 metros (en condiciones ideales)
Frecuencia de operación	2.4GHz ISM band
Potencia de transmisión	Clase 2, hasta 4dBm
Velocidad de datos	2.1Mbps
Modulación	GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
Voltaje de alimentación	3.6V – 6V (recomendado)
Corriente en modo de espera	Menos de 2.5mA
Corriente en modo de transmisión	Alrededor de 30mA
Dimensiones	3.5cm x 1.5cm x 0.5cm
Peso	3g

Fuente: Elaboración Propia

Fue necesario designar uno de los módulos Bluetooth como el "master" y el otro como el "slave" en el prototipo de EEG canino. El módulo "master", conectado a la PC, asumió el control de la comunicación y la transmisión de las señales, mientras que el módulo "slave", integrado al dispositivo Mindflex para capturar las señales electroencefalográficas del can, actuó como receptor, transmitiendo la información al "master", esta estructura simplificó la configuración de la comunicación Bluetooth.

5.1.1.3. *Booster DC MT3608*

El Booster DC MT3608 fue de alta relevancia en el uso integrado con el headset del Mindflex para encender el Arduino con la misma batería, permitiendo elevar el voltaje de la batería del Mindflex de 3.7V a 7V. Esto eliminó la necesidad de utilizar una fuente de alimentación separada para el Arduino, simplificando el diseño del sistema y reduciendo la complejidad del cableado.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del Booster DC MT3608

Características	Especificaciones
Rango del voltaje de entrada	2V – 24V
Voltaje de salida ajustable	2V – 28V
Corriente de salida máxima	2A
Eficiencia de conversión	Hasta 93%
Frecuencia de conmutación	1.2MHz
Protecciones integradas	<u>Sobrecarga</u> , cortocircuito y sobretensión
Potenciómetro de ajuste de voltaje	Sí
Dimensiones	Aprox. 36mm x 17mm x 14mm
Peso	4g

Fuente: Elaboración Propia

5.1.1.4. *Mindflex*

El dispositivo Mindflex fue de mucha ventaja para la elaboración de este estudio, con su capacidad de ofrecer una interfaz intuitiva y fácil de usar que permitió la captura y visualización de señales en tiempo real. Esto simplificando el proceso de recolección de datos y permitiendo una retroalimentación instantánea durante el adiestramiento de los perros. El diseño compacto y ligero del Mindflex permitió que sea utilizado cómodamente para los sujetos de prueba, siendo ventajoso en entornos diversos y en movimiento. Eso fue beneficioso para este tipo de estudio de comportamiento animal, donde la movilidad y comodidad son de importancia.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del Dispositivo Mindflex

Características	Especificaciones
Tecnología	EEG
Modos de operación	Entretenimiento
Interfaz inalámbrica	Bluetooth o Wifi
Frecuencia de muestreo	Varía entre 128Hz y 512Hz

Fuente: Elaboración Propia

Al terminar la fase de selección de componentes que se implementaron en la elaboración del prototipo se llevó a cabo la fase del diseño del sistema, consistiendo en

el diseño esquemático del sistema, instalación del cableado eléctrico y configuración de los componentes (Sección 5.1.2).

5.1.2. DISEÑO DEL SISTEMA

En esta fase se presentó una etapa importante para el desarrollo de la investigación, estableciéndose los fundamentos del proyecto, incluyendo la conexión del cableado eléctrico, diseño esquemático, así como la estimación y resolución de costos asociados. Esta etapa brindó comprensión de cada componente y su relevancia en la disposición del sistema, lo que facilitó la identificación de posibles limitaciones técnicas o presupuestarias desde el principio. También, el diseño del sistema proporcionó una guía estructurada para la implementación física y práctica del prototipo, haciendo posible la ejecución eficiente del dispositivo.

Cuando el diseño esquemático pasó por el proceso de validación se procedió al diseño físico del mismo, así mismo se realizaron pruebas exitosas comprobando el envío de señales de EEG del diseño físico inalámbricamente hacia la computadora.

5.1.2.1. *Diseño Esquemático del Prototipo*

El diseño esquemático del prototipo proporcionó una representación visual de la estructura del sistema, esto facilita la comprensión del funcionamiento. Esta visualización preliminar ayudó a identificar posibles errores en el diseño antes de la implementación física, lo que ahorra tiempo en las etapas posteriores del proyecto.

Realizar un diseño esquemático sirvió como una referencia detallada durante todo el proceso de desarrollo, proporcionó una base sólida para análisis y actualizaciones del sistema (Ilustración 9).

En el diseño que se realizó, se detalló la conexión entre cada uno de los componentes para una mayor comprensión visual de su funcionamiento, y el cómo se comunican entre sí para la adecuada captura de los datos y el envío de las mismas para poder visualizarlas en tiempo real y proceder con el análisis de los resultados de las pruebas.

Dentro del diseño esquemático, se pudo visualizar que el dispositivo Mindflex es la base del prototipo, este desempeñó su papel más importante capturando las señales

electroencefalográficas, enviando estas al Arduino Uno conectado a la computadora, junto con un módulo Bluetooth HC-05 nombrado "master", encargado de recibir las señales del chip Neurosky del dispositivo Mindflex. El Arduino Uno conectado con el Booster DC MT3608 y el módulo Bluetooth HC-05 nombrado "slave" se encargaba de recolectar las señales del Mindflex y enviarlas inalámbricamente a la PC.

Diseño Esquemático de Prototipo

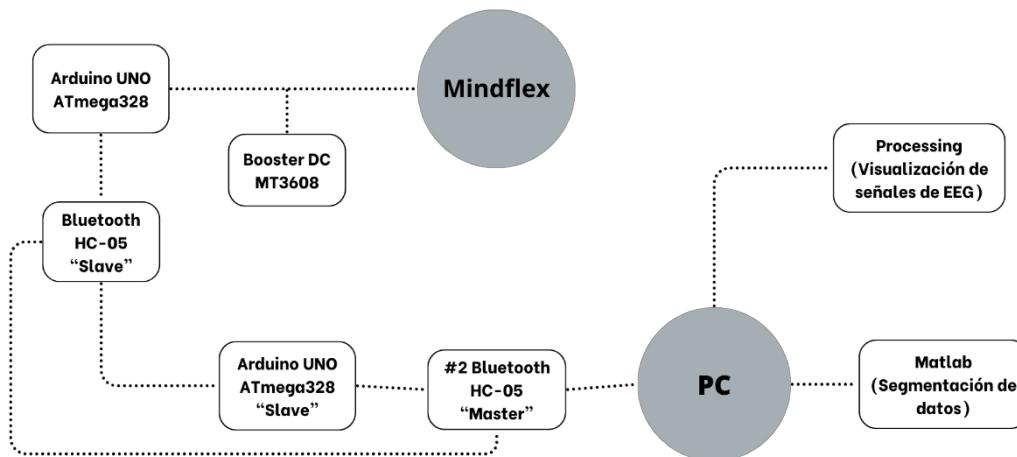


Ilustración 9. Diseño esquemático del prototipo

Fuente: Elaboración Propia

5.1.2.2. Conexiones del cableado eléctrico

Como primer paso a la elaboración del prototipo de manera física, se procedió a seleccionar los pines a utilizar entre el Mindflex y el Arduino Uno con el Bluetooth HC-05 "slave", los cuales fueron los pines Tx, Rx, 10, 11, GND (Ground). Estos pines hicieron posible establecer una conexión directa entre el Mindflex, Arduino Uno, el módulo Bluetooth "slave" y el Booster DC MT3608.

Se conectó el Arduino Uno ATmega328 al Mindflex, tomando el GND (Ground) del dispositivo Mindflex al GND del Arduino Uno, y el pin Tx del Mindflex al Rx del Arduino Uno, soldando cada uno de los cables correspondientes. En este caso el Mindflex actuó como el dispositivo emisor de los datos y el Arduino Uno como el receptor, se estableció así un canal de comunicación unidireccional donde el Mindflex transmite los datos generados por su chip Neurosky hacia el Arduino para su procesamiento y envío

de datos. La conexión del GND, fue importante establecerla para asegurar una referencia común de voltaje y evitar problemas de ruido eléctrico. Esto permite una comunicación estable entre el Mindflex y el Arduino. (Ilustración 10)

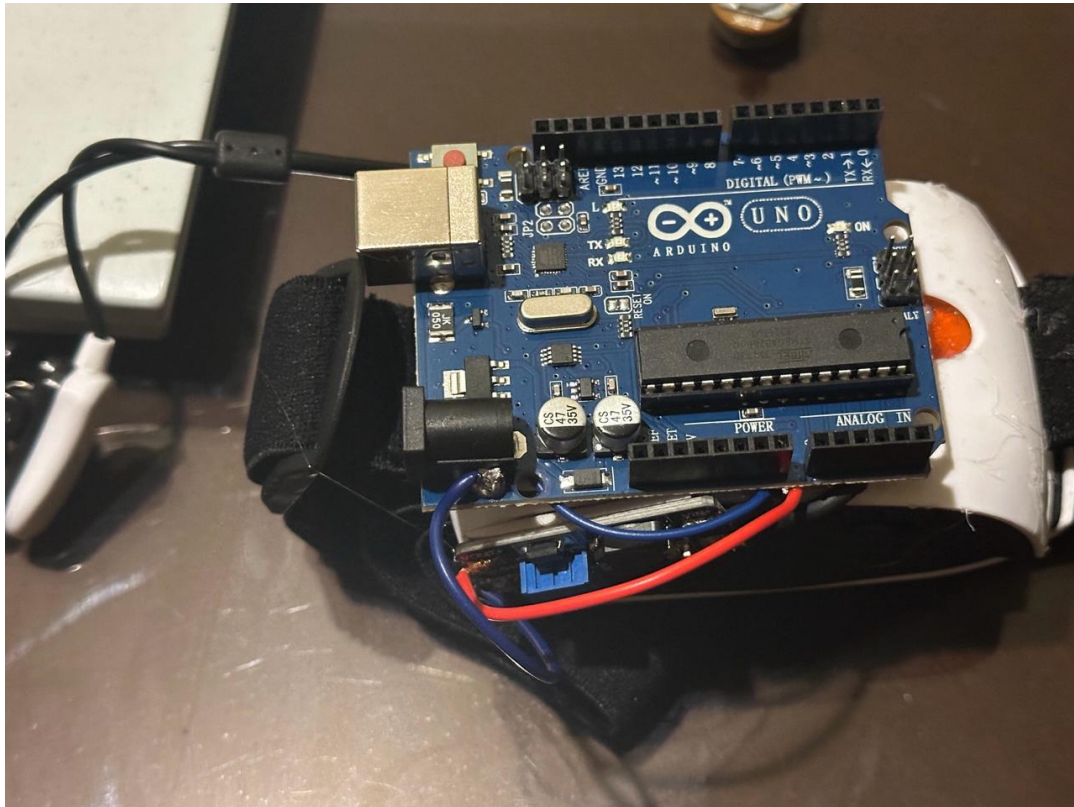


Ilustración 10. Conexión de cableado eléctrico del Arduino hacia el Mindflex

Fuente: Elaboración Propia

Se llevó a cabo la configuración de ambos módulos Bluetooth HC-05, uno como "master" y el otro como "slave". Siendo el "master" el que recibe los datos enviados por el módulo denominado "slave". Una vez finalizada la configuración de ambos módulos se procedió a la conexión respectiva del módulo "slave" con el Arduino Uno conectado al dispositivo Mindflex.

Con el módulo HC-05 nombrado "slave", se estableció una conexión con el Arduino utilizando el Rx del módulo Bluetooth hacia el pin 11 del Arduino. Así mismo, el pin Tx del módulo Bluetooth se conectó al pin 10 del Arduino Uno, igualmente el VCC del módulo Bluetooth hacia los 5V del Arduino, para permitir una conexión eléctrica eficiente. (Ilustración 11)

Cuando se estableció conexión con el módulo Bluetooth y el Arduino Uno, se optó por implementar la misma fuente de alimentación del Mindflex con el Arduino Uno. Para hacer esto posible se utilizó el Booster DC MT368, se conectó el negativo (-) del Booster al positivo (+) del Mindflex, de igual manera, el positivo del Booster hacia el interruptor ON del Mindflex. Esta conexión elevó los 3.7V de la batería del Mindflex a 7V, y estos 7V fueron al Vin (voltaje de entrada) del Arduino Uno.

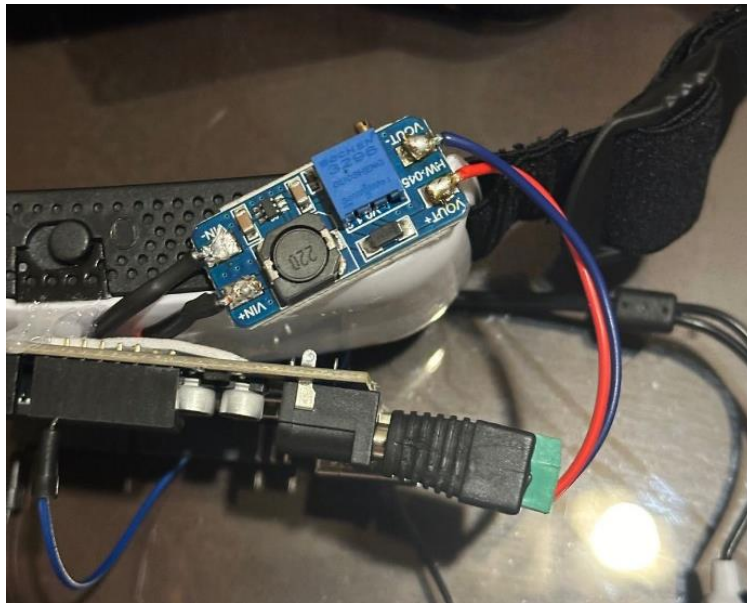


Ilustración 11. Conexión del módulo Booster

Fuente: Elaboración Propia

5.1.2.3. Resolución de costos

Los costos descritos en la moneda local, Lempiras (Tabla 9), para el desarrollo del prototipo para el estudio de señales de EEG con chip Neurosky del dispositivo Mindflex en perros entrenados y no entrenados, se ven distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 9. Tabla de Costos

Cantidad	Materiales	Costo Unitario	Costo Total
2	Arduino Uno ATmega328	520	1040
2	Bluetooth HC-05	320	640
1	Booster DC MT3608	80	80
1	Jumpers	250	250
2	Protoboards	180	360
1	Mindflex	500	500
	Total:		2870

Fuente: Elaboración Propia

5.2. CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO MINDFLEX Y ARDUINO UNO

En la etapa de diseño de pruebas de integración, se realizaron pruebas correspondientes a la intercomunicación de los módulos Bluetooth HC-05 para el eficiente envío de los datos del dispositivo Mindflex hacia la computadora de forma inalámbrica, permitiendo un mejor desempeño en el adiestramiento de las pruebas en los canes.

5.2.1. PROGRAMACIÓN DE ARDUINO UNO

El código en Arduino IDE (Ilustración 12) incluyó bibliotecas necesarias para la interactuar con el dispositivo Mindflex, facilitando la comunicación entre el Arduino y el Mindflex (Tabla 10), utilizando el módulo Bluetooth "slave" que envía los datos.

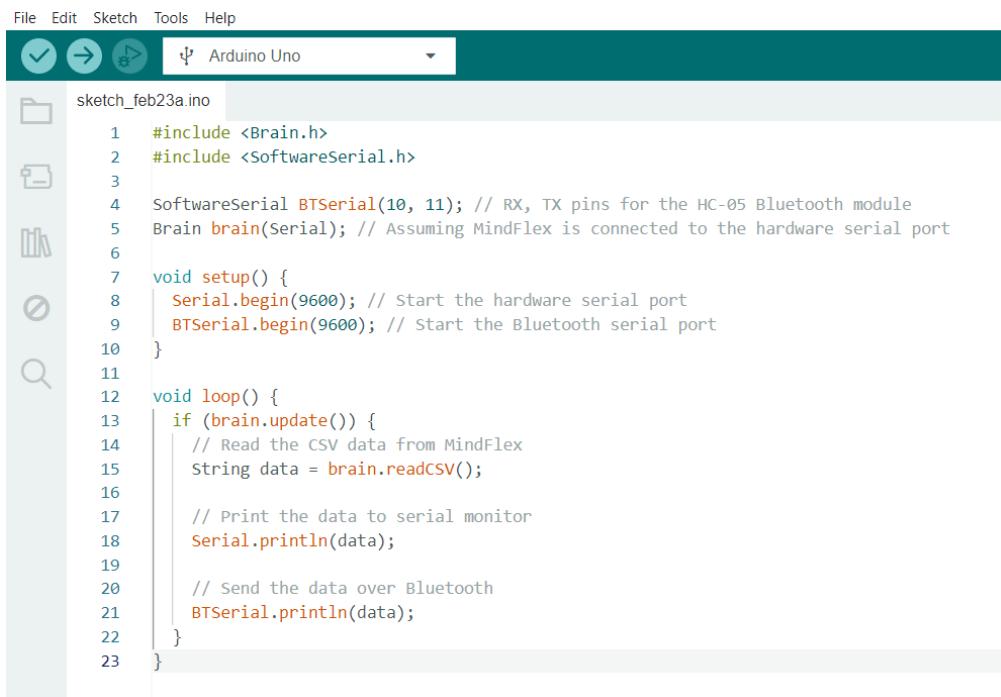
Tabla 10. Bibliotecas necesarias para la comunicación entre Arduino y el dispositivo Mindflex

Biblioteca	Función
Brain.h	Esta biblioteca proporciona funciones y métodos que simplifican la comunicación entre el Arduino y el Mindflex. Permite acceder a los datos generados por el chip Neurosky del Mindflex de una manera más estructurada, haciendo más fácil la lectura de los datos cerebrales capturados.
SoftwareSerial.h	Esta biblioteca se utilizó para crear una comunicación serial entre los pines digitales del Arduino (10 y 11). Necesario ya que el puerto serial hardware del Arduino Uno (pins 0 y 1) están siendo utilizados para la comunicación con el Mindflex. Al utilizar SoftwareSerial, se puede establecer una comunicación serial en otros pines digitales del Arduino, esto permitió la conexión con el módulo Bluetooth HC-05 en los pines 10

Fuente: Elaboración Propia

En el código se definió un objeto 'brain' que utiliza la comunicación serial del Arduino. En la función 'setup()', se inician las comunicaciones seriales para el puerto hardware ('Serial') a una velocidad de 9600 baudios, así también para el puerto de comunicación Bluetooth ('BTSerial'). En la función 'loop()' se verificó si hay nuevos datos disponibles desde el dispositivo Mindflex utilizando la función 'update()' del objeto 'brain'. Si hay datos nuevos disponibles, se leen los datos en formato CSV (valores separados por comas) con la función 'read CSV()' y se almacenaron en una variable 'data' de tipo 'String'. Los datos capturados se imprimen en el monitor serial utilizando la función 'println()' para que puedan ser visualizados en el Monitor Serial del Arduino IDE.

La información de este código presentó la fuerza de la señal, niveles de atención, meditación y mediciones de ondas cerebras: delta, theta (baja y alta), alfa (baja y alta), beta (baja y alta) y gamma (alta). Utilizando la función 'Serial.println()' estos datos se imprimen en la consola serial del Arduino.



```
File Edit Sketch Tools Help
sketch_feb23a.ino
1 #include <Brain.h>
2 #include <SoftwareSerial.h>
3
4 SoftwareSerial BTSerial(10, 11); // RX, TX pins for the HC-05 Bluetooth module
5 Brain brain(Serial); // Assuming MindFlex is connected to the hardware serial port
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(9600); // Start the hardware serial port
9   BTSerial.begin(9600); // Start the Bluetooth serial port
10 }
11
12 void loop() {
13   if (brain.update()) {
14     // Read the CSV data from MindFlex
15     String data = brain.readCSV();
16
17     // Print the data to serial monitor
18     Serial.println(data);
19
20     // Send the data over Bluetooth
21     BTSerial.println(data);
22   }
23 }
```

Ilustración 12. Programación de Biblioteca Brain para visualización de las señales de EEG con módulo Bluetooth “slave”

Fuente: Elaboración Propia

A través de este código, se obtuvieron los datos necesarios de señales electroencefalográficas para llevar a cabo la visualización y el análisis de las ondas cerebrales durante la fase de prueba.

El código constituyó una prueba para la adquisición de los datos provenientes del dispositivo Mindflex, el cual captura la información cerebral. Se encargó de transformar los datos binarios generados por el chip Neurosky en una secuencia de caracteres ASCII, organizada en forma de una cadena estructurada con valores separados por comas (Ilustración 13). Esta representación permite la visualización de diversas métricas relacionadas con la actividad cerebral, incluyendo mediciones de frecuencias cerebrales específicas, como los niveles de atención, meditación y concentración, y otros parámetros. Cuando el código fue ejecutado en Arduino IDE, dio como resultado 11 datos numéricos, cada uno representando actividades cerebrales (Tabla 11).

Tabla 11. Ondas cerebrales y su orden según la programación en Arduino

Posición	Onda cerebral
1	Calidad de la señal
2	Atención
3	Meditación
4	Delta (Dreamless Sleep)
5	Theta (Drowsy)
6	Low Alpha (Relaxed)
7	High Alpha (Relaxed)
8	Low Beta (Alert)
9	High Beta (Alert)
10	Low Gamma (Multi-sensory processing)
11	High Gamma

Fuente: Elaboración Propia

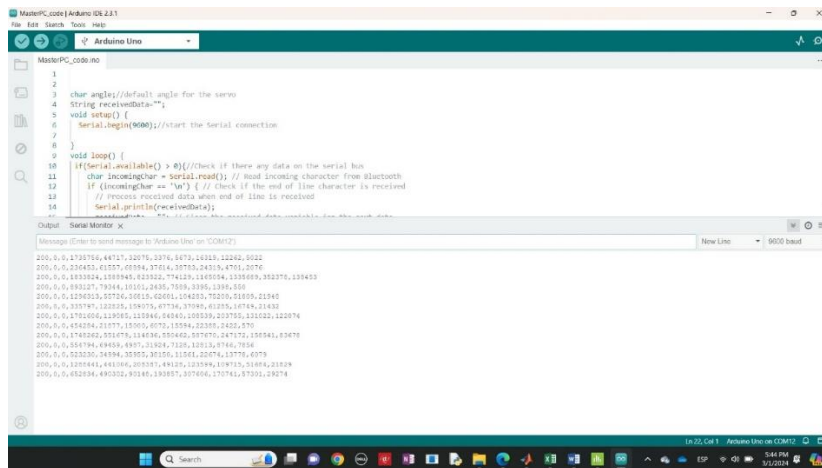


Ilustración 13. Datos de los rangos de ondas cerebrales en Arduino IDE

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2. PROGRAMACIÓN MÓDULO BLUETOOTH HC-05 Y ARDUINO UNO

Para el desarrollo de la instalación del dispositivo Mindflex con el Arduino Uno, se realizaron una serie de pasos importantes para asegurar una conexión eficiente de los dos módulos Bluetooth HC-05, uno trabajando como "slave" enviando los señales del Mindflex, y el segundo trabajando como "master" recibiendo estos datos a la computadora, ambos acompañados de un Arduino Uno. Se comenzó conectando en una protoboard ambos módulos Bluetooth (Ilustración 14), pero realizando la configuración uno por uno, empezando por el módulo Bluetooth con su función de "slave". Para poner el primer módulo Bluetooth en estado de esclavo o "slave" fue necesario subir una hoja de código vacía para el Arduino y configurarlo usando comandos AT. Para enviar los comandos al módulo Bluetooth se deben conectar los pines de la siguiente manera (Tabla 12).

Tabla 12. Conexiones del módulo Bluetooth "slave" hacia el Arduino Uno

Pin	Pin Arduino
Rx	Rx
Tx	Tx
Vcc	5V
GND	GND

Fuente: Elaboración Propia

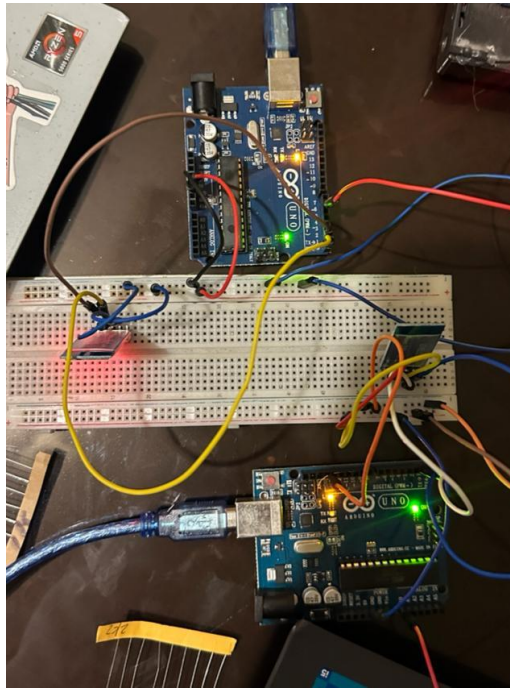
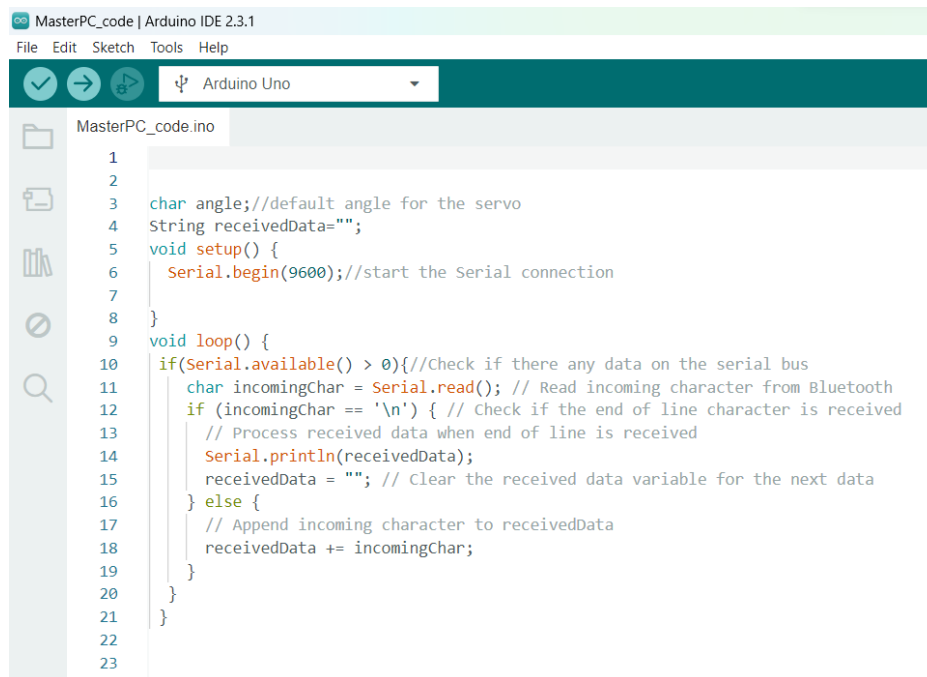


Ilustración 14. Configuración módulos Bluetooth HC-05 "Slave" y "Master"

Fuente: Elaboración Propia

Para que el módulo Bluetooth se encontrara en modo comando se presionó el botón en el módulo, mientras se presionaba se desconectó la fuente de alimentación y se reconectó. Cuando la luz led del módulo empezó a parpadear cada 2 segundos se reconoció que el módulo había ingresado exitosamente al modo comando AT. El módulo esclavo o "slave" envió las señales del Arduino en el Mindflex hacia el segundo módulo Bluetooth nombrado "master", que se encargaba de recibir esos datos en el Arduino primario encontrado en la computadora.

Se desarrolló un código para el Arduino Ide en el módulo Bluetooth "master", que se encargaba de recibir las señales (Ilustración 15) hacia el Arduino Uno del PC.



```
MasterPC_code | Arduino IDE 2.3.1
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
MasterPC_code.ino
1
2
3 char angle;//default angle for the servo
4 String receivedData="";
5 void setup() {
6   Serial.begin(9600);//start the Serial connection
7
8 }
9 void loop() {
10  if(Serial.available() > 0){//Check if there any data on the serial bus
11   char incomingChar = Serial.read(); // Read incoming character from Bluetooth
12   if (incomingChar == '\n') { // Check if the end of line character is received
13     // Process received data when end of line is received
14     Serial.println(receivedData);
15     receivedData = ""; // Clear the received data variable for the next data
16   } else {
17     // Append incoming character to receivedData
18     receivedData += incomingChar;
19   }
20 }
21 }
22
23
```

Ilustración 15. Código módulo Bluetooth "master" en Arduino Ide

Fuente: Elaboración Propia

Este código hizo posible la lectura de los datos enviado a través de la comunicación serial desde el módulo Bluetooth HC-05, y procesarlos en el Arduino Uno. Se declaró una variable 'angle' para almacenar un ángulo y una cadena de caracteres 'receivedData' para almacenar los datos recibidos a través de la intercomunicación serial. En la función 'setup()' se inició la comunicación con una velocidad de 9600 badios, utilizando 'Serial.begin(9600)'. En el código, la función 'loop()' es el bucle principal del programa, donde se lleva a cabo la mayoría de la ejecución del código.

Con la función 'char incomingChar = Serial.read();', se lee el carácter entrante desde el Mindflex por medio del módulo Bluetooth y se almacena en la variable 'incomingChar'. Si se ha recibido una línea completa de datos, esto con la función 'Serial.println(receivedData)', se imprime en el monitor serial la cadena almacenada en 'receivedData'.

Este código permitió la recepción de los datos a través de la comunicación serial, leyéndolos e imprimiéndolos en el monitor serial una vez recibida una línea completa de datos.

5.2.3. EVALUACIÓN DE PRUEBA DE LAS ONDAS EN PROCESSING

El uso de Processing para procesar señales cerebrales, como las obtenidas mediante electroencefalogramas (EEG), fue fundamental en la investigación neurocientífica. Estas señales representan la actividad eléctrica del cerebro y son clave para comprender procesos cognitivos y emocionales.

El análisis detallado de estas señales permite identificar patrones neuronales asociados con diferentes estados mentales. Las ondas cerebrales de distintas frecuencias (delta, theta, alfa, beta, gamma) están vinculadas a estados específicos, como el sueño profundo, la relajación o la concentración.

Visualizar y entender estas señales proporcionó datos relevantes sobre la actividad cerebral en el contexto de adiestramiento canino, desde el estudio de la concentración y el procesamiento cognitivo.

En el ámbito del entrenamiento canino, la capacidad de visualizar estas señales en tiempo real durante el adiestramiento permitió a los entrenadores comprender mejor cómo reaccionan los perros a diferentes estímulos y ajustar sus técnicas de entrenamiento en consecuencia. El uso de Processing fue de gran ayuda para visualizar y asegurar que el dispositivo estuviera funcionando correctamente, permitiendo observar en tiempo real la actividad cerebral registrada y garantizando así que cada banda de frecuencia se reflejara adecuadamente. La capacidad de visualización en tiempo real aseguró la calidad de los datos recopilados e identificó cualquier anomalía o irregularidad en la señal, como lo pudo ser el ruido en la señal, lo que contribuyó significativamente a la confiabilidad de los resultados obtenidos.

En los canes con pelaje en las orejas, donde se necesitó colocar el sensor de clip, se notó la captura nula de las señales de "Atención" y "Meditación", debido a que el pelo actuó como un aislante, haciendo un poco difícil la captura de estos datos.

Al visualizar las señales filtradas en Processing, se comprobó que el dispositivo estuviera trabajando correctamente en el adiestramiento del sujeto 2 (Ilustración 16). Los canales reflejaban las ondas Low Alpha y High Alpha, asociadas con el estado mental alerta en los caninos y en el enfoque, viéndose muy bajas durante el adiestramiento. Las

ondas Low Beta igualmente se encontraron bajas, y estas están asociadas con el pensamiento activo, solución de problemas, toma de decisiones. Las ondas High Beta, por otro lado, están asociadas con el estrés y la ansiedad, y se pudo visualizar como esta se elevaba durante el entrenamiento.



Ilustración 16. Señales en Processing Sujeto 2 No Entrenado

Fuente: Elaboración Propia

5.3. PROCEDIMIENTO DE CAPTURA DE SEÑALES

Durante el proceso de captura de las señales de EEG con el prototipo para análisis de estas señales en perros entrenados y no entrenados se consideraron aspectos como la edad, entorno donde se realizó el entrenamiento, cantidad de mediciones y calidad de la señal, siendo de mucha importancia llevar a cabo el adiestramiento en un ambiente seguro, para evitar sobre estimulación en los sujetos de prueba.

5.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

La variación de la magnitud en las señales de electroencefalograma (EEG) en perros entrenados y no entrenados dependió de factores como el entorno de adiestramiento, edad, raza, nivel de entrenamiento y mediciones realizadas.

El sujeto 1, Rottweiler, con edad de un año y tres meses, al encontrarse en esta etapa importante de desarrollo físico y mental, están experimentando cambios significativos en su cuerpo y en su comportamiento a medida que maduran hacia la

adulthood. Este periodo de transición puede provocar un aumento en los niveles de energía, lo que se traduce en comportamiento hiperactivo. Es por esto que durante el adiestramiento mostró un comportamiento muy activo y energético, lo que dificultó un poco el enfoque del perro a la hora de recibir los comandos.

Por otro lado, en el sujeto 2, raza mixta, con 5 años y medio de edad, se encontraba en una etapa donde su estado de ánimo es tranquilo, pero siendo su nivel de entrenamiento nulo, hubo más dificultad en el posicionamiento estable del dispositivo y más difícil para el can en sentirse dentro de su zona de confort. Debido a su inquietud se optó por utilizar un gorro para la ansiedad que sirvió de soporte para el dispositivo y se logró capturar las señales de manera precisa (Ilustración 17).



Ilustración 17. Sujeto 2 no entrenado soporte de cabeza

Fuente: Elaboración Propia

En el sujeto 3, igualmente Rottweiler, pero con 2 años y medio de edad, nivel de entrenamiento alto, se encontró ya pasada la etapa activa y de crecimiento rápido. Ya ha alcanzado su tamaño y peso de adulto completo. Fue más calmado en el proceso del adiestramiento en la colocación del prototipo no se necesitó de ningún tipo de asistencia

o soporte a la cabeza, solamente el prototipo. Mostró un comportamiento equilibrado y maduro.

El sujeto 4, raza mixta, 4 años de edad, presentó un comportamiento ansioso al no estar acostumbrado a tener objetos sobre su cabeza. Esto fue una limitante en el tiempo y comodidad del can en su adiestramiento, la edad y su nivel de entrenamiento influyeron en la interpretación de las señales.

Para lograr una interpretación precisa de las señales de EEG en los canes fue necesario considerar aspectos que influyen en el proceso de toma de las mediciones, considerando esto importante para así darle prioridad al bienestar emocional de los canes durante el entrenamiento, para que pueda ser una experiencia amena tanto para el entrenador como para la mascota (Tabla 13).

Tabla 13. Características de los sujetos de prueba

Sujeto	Raza	Edad	Nivel de entrenamiento	Cantidad de mediciones	Calidad de la señal
1	Rottweiler	1 año y 3 meses	Entrenado	1	Excelente
2	Mixta	5 años 4 meses	No entrenado	2	Moderada
3	Rottweiler	2 años 5 meses	Entrenado	2	Excelente
4	Mixta	4 años	No entrenado	3	Moderada

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la calidad de la señal, se tomaron en cuenta los valores de «Calidad de la Señal» recibidos desde el dispositivo Mindflex hasta el monitor serial de Arduino IDE, la primera columna de valores numéricos representaba la calidad de la señal durante cada segundo que pasaba, así pudiendo definir con la ayuda de estos valores si la señal fue excelente, moderada o baja.

Si los valores obtenidos en los correspondientes a la calidad de la señal eran igual a 0, la señal era muy buena. Cualquier número mayor a 0 representaba al ruido existente en la señal. Si el valor era 200, quería decir que, el sensor de ThinkGear no estaba en contacto directo con la piel del sujeto. Destacando que los sujetos de este estudio eran caninos, el pelo de los canes actuaba como ruido en la señal.

La lógica de la clasificación de la calidad de la señal radicó en la fórmula matemática (Ilustración 18), siendo T el total de segundos en el período de tiempo del

entrenamiento y V el número total de valores recopilados en ese periodo. C representaba el número total de segundos en los que se detectó contaminación de ruido, es decir, los segundos en los que el valor no era igual a 0. De esta manera, se calculó la proporción de tiempo.

$$\text{Proporción de tiempo con ruido} = \frac{C}{T}$$

Ecuación 1. Fórmula Calidad de la señal

Fuente: Elaboración Propia

En el Sujeto 1, can entrenado, su periodo de evaluación fue de 1 minuto 50 segundos, de los cuales se tomó en cuenta el periodo de tiempo del segundo 50 al segundo 100, ya que en ese momento se le brindaron la mayoría de los comandos. Dentro de esos 50 segundos, 11 de esos segundos eran valores numéricos de 26 y 56, esto significando el ruido en la señal en pequeños lapsos de tiempo, se determinó que era una señal de excelente calidad debido a que dividiendo los 11 valores numéricos simbolizando el ruido en la señal, entre los 50 segundos de señal que se evaluó, resultó en 0.2 de la proporción del tiempo donde hubo ruido (Ilustración 19). Aplicando la fórmula para determinar si la señal fue baja, moderada o excelente, se definieron algunas condiciones (Tabla 14).

Tabla 14. Condición calidad de la señal

Calidad de la señal	Condición
Señal Baja	Proporción de tiempo con ruido >0.5
Señal Moderada	Proporción de tiempo con ruido entre 0.25 y 0.5
Señal Excelente	Proporción de tiempo con ruido <0.25

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Proporción de tiempo con ruido} = \frac{11}{50} = 0.2 \approx \text{Excelente}$$

Ecuación 2. Calidad de la señal Sujeto 1

Fuente: Elaboración Propia

5.3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la realización de la recolección de los datos de la investigación, se procedió con la captura de las señales de EEG de los canes en sesiones de 30 segundos a 1 minuto. Para poder emplear este procedimiento se utilizó el dispositivo Mindflex, con su configuración de Arduino y los módulos Bluetooth, de esta manera hacer posible una conexión inalámbrica y que el proceso de adiestramiento fuera más fácil. Este dispositivo pudo hacer la recolección de los datos por medio de la programación pre establecida en el software Arduino IDE.

La programación se encargó de leer y recibir los valores numéricos del Mindflex, para comprender la conducta de las ondas cerebrales cada segundo del entrenamiento. El dispositivo Mindflex en tres de los cuatro sujetos fue colocado en la cabeza con la ayuda de un gorro para la ansiedad, que hacia posible el mantener el dispositivo en la cabeza de los perros y permitía mantener el prototipo protegido de cualquier movimiento brusco o alteración por parte del estado de ánimo de los sujetos.

El Mindflex se colocó sobre la cabeza de los canes, cubriendo sus orejas, la parte frontal donde se encuentran los sensores, fue colocada sobre los ojos del can, el lado izquierdo es donde se sitúa el chip Neurosky. Para asegurar la lectura correcta de las bandas de frecuencia debía estar colocado sobre la piel de la oreja del perro.

Los puntos focales en un EEG canino son ubicaciones específicas en el cuero cabelludo del animal, se colocó el dispositivo sobre estos puntos para registrar la actividad cerebral, estos puntos son estandarizados utilizados para obtener mediciones. Los puntos focales O2 y O1 (Occipital 2 y Occipital 1), se colocan en la región occipital del cráneo del perro, asociadas con la visión y el procesamiento visual, el punto focal T4 (Temporal 4), está asociada con la audición y el procesamiento auditivo. Los sensores del dispositivo Mindflex captura las señales cerebrales por medio del sensor de clip de oreja (Ilustración 20).



Ilustración 18. Colocación del prototipo en Sujeto 3

Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a la toma de señales con la integración del dispositivo y los módulos Bluetooth, operando desde el Arduino IDE. La comunicación del módulo Bluetooth "slave" en el Mindflex y el módulo Bluetooth "master" en la computadora, facilitó el envío de datos de forma inalámbrica, haciendo posible trabajarlo en tiempo real.

5.3.3. TRANSPORTACIÓN DE DATOS DE ARDUINO IDE CON PYTHON

Tras obtenidos los valores en el monitor serial de Arduino Uno, se procedió a almacenarlos en un archivo de texto (.txt). De esta manera, almacenados los valores numéricos, se programó en el software Python un código capaz de importar el archivo de texto a un documento en Excel (Ilustración 21).

```
py.py - C:\Users\krishn\Documents\PROYECTO DE INVESTIGACION\Matlab\py.py (3.11.8)
File Edit Format Run Options Window Help
import pandas as pd

# Lee el archivo de texto
with open('C:/Users/krishn/Documents/PROYECTO DE INVESTIGACION/Matlab/KaiDatosToma2.txt', 'r') as file:
    lines = file.readlines()

# Extrae los valores de cada línea
values = [line.strip().split(',') for line in lines]

# Crea un DataFrame de pandas con los valores extraídos
data = pd.DataFrame(values)

# Guarda los datos en un archivo Excel
data.to_excel('C:/Users/krishn/Documents/PROYECTO DE INVESTIGACION/Matlab/datos.xlsx', index=False)
```

Ilustración 19. Código Python Transportar Valores a Excel

Fuente: Elaboración Propia

El código se encarga de importar la biblioteca 'pandas' con el alias 'pd', que funciona para la manipulación y análisis de los datos. Luego se encarga de leer el archivo de texto, se coloca el nombre del archivo que se quiera leer y se llama a la ruta u origen del documento. El código divide cada línea por comas (,) para obtener los valores individuales y los almacena en una lista llamada 'values'. Se creó un DataFrame de pandas utilizando los valores extraídos de 'values', así cada lista interna en 'values' se convierte en una fila en el DataFrame. Finalmente, guarda el DataFrame creado en un archivo de Excel, que lo nombra 'datos.xlsx' en la misma ubicación donde se encuentre el archivo de texto.

Este código permitió la automatización del proceso, fue de mucha utilidad ya que es un proceso que se realizó en repetidas ocasiones, ahorrando tiempo en el proceso de almacenamiento de los datos para su posterior exportación. Los datos fueron transferidos sin error humano, haciendo más exacta la reproducibilidad de los datos.

5.3.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS SEÑALES

Los datos recopilados del software de desarrollo de Arduino IDE, al ser transportados sus valores numéricos a un archivo de texto, se procedió a exportarlos a un archivo de Excel por medio del software de programación Python. Esto con el fin de dar lectura a los mismos haciendo uso del software Matlab. En Matlab, se llevó a cabo algunos parámetros para que esto fuera posible, como ser: la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier y los gráficos representando cada una de las ondas cerebrales que se consideraron para el estudio (Delta, Theta, Low Alpha, High Alpha, Low

Beta, High Beta, Low Gamma, High Gamma), y su comportamiento en el tiempo que duró el entrenamiento de los sujetos de prueba.

5.3.4.1. Transformada de Fourier y Gráficas del comportamiento de las ondas en Matlab

Para realizar la transformación de los datos del dominio del tiempo a la frecuencia se utilizó la Transformada Rápida de Fourier (FFT). La FFT es una herramienta matemática para analizar señales en los términos de cada uno de sus componentes de frecuencia que además permite comprender mejor las características de estas, en aplicaciones donde se necesita convertir datos de magnitudes de señales eléctricas en microvoltios a Hertz (Hz), así pudiéndose analizar la distribución del espectro en una señal eléctrica.

Se utilizó la aplicación de MATLAB para cargar los datos obtenidos por el Arduino y aplicarles la FFT. Esto permitió convertir los datos a sus frecuencias en Hz (Ilustración 22). El uso de esta herramienta permitió agrupar estos datos de acuerdo a las bandas de frecuencia que representan lo cual ayudó al momento de realizar el análisis estadístico de los resultados con la aplicación de Minitab.

```
19 %%%%% Cargar datos desde el archivo Excel 56segundos
20 %archivo_excel = 'C:\Users\krisn\Documents\PROYECTO DE INVESTIGACION\Matlab\kai2.xlsx';
21 %hoja_datos = 'kai2';
22
23
24
25 % Load data from Excel file
26 %data = readmatrix(archivo_excel, 'Sheet', hoja_datos, 'Range', 'A2:K56');
27
28 % Leer datos desde excel
29 datos = xlsread(archivo_excel, hoja_datos);
30
31 % Aplicar ventana de Hamming a los datos
32 datos_ventaneados = datos .* hamming(length(datos));
33
34 % Procesamiento de datos
35 datos_ventaneados = datos_ventaneados(:);
36
37 % Extraer la frecuencia de muestreo
38 frecuencia_muestreo = 512;
39
40 % Crear vector de tiempo
41 tiempo = (0:length(datos_ventaneados)-1) / frecuencia_muestreo;
42
43 % Visualizar la señal en el dominio del tiempo y la magnitud de la FFT
44 figure;
45
46 % Subplot para la señal en el dominio del tiempo
47 subplot(2, 1, 1);
48 plot(tiempo, datos_ventaneados);
49 title('Señal en el dominio del tiempo');
50 xlabel('tiempo(s)');
51 ylabel('amplitud');
```

Ilustración 20. Transformada Rápida de Fourier en Matlab

Fuente: Elaboración Propia

En la primera parte del código utilizado en MATLAB se comenzó definiendo la variable 'archivos_excel' el cual esta referenciado a la hoja de Excel especifica en la cual se guardaron los datos brutos obtenidos por el Arduino junto con el Mindflex, de igual forma se definió la hoja especifica en la cual los datos estarían dentro del archivo de Excel. Finalmente se utiliza la función 'xlsread' para leer los datos y almacenarlos dentro de la variable 'datos'.

Una vez leídos los datos, se les aplicó la ventana de 'hamming'. Esta es una función que se utiliza comúnmente al procesar señales ya que ayuda a mejorar la precisión al momento de realizar la FFT. Funciona reduciendo el efecto de las continuidades que suelen estar presentes al principio y al final de las señales obtenidas. El resultado obtenido luego de aplicar la ventana de 'hamming' se almacena en la variable 'datos_ventaneados' y luego estos se convierten en un vector unidimensional utilizando 'datos_ventaneados(:)'.

La frecuencia de muestreo fue definida con un valor de 512 debido a que es la que utiliza el Mindflex. Luego, se creó un vector de tiempo que representa el tiempo en segundos para cada línea de datos el cual está basado en la longitud de los datos y la frecuencia de muestreo que se definió. Finalmente, se crea una figura y se trazan los datos de amplitud en función del tiempo con 'plot(tiempo, datos_ventaneados)'.

En el siguiente segmento del código se les realizó la FFT a los datos procesados en el segmento anterior. Se comenzó calculando la longitud de los datos los cuales fueron almacenados en la variable "n" y con la función 'fft' se calcula la transformada rápida de Fourier y se almacenan en la variable 'fft_resultado' (Ilustración 23).

```

53 % Realizar la transformada rápida de Fourier
54 n = length(datos_ventaneados);
55 fft_resultado = fft(datos_ventaneados);
56 frecuencias = (0:n-1)*(frecuencia_muestreo/n);
57
58 % Calcular la magnitud de la FFT
59 magnitud_fft = abs(fft_resultado/n);
60
61 % Descartar las frecuencias negativas
62 frecuencias = frecuencias(1:floor(n/2));
63 magnitud_fft = magnitud_fft(1:floor(n/2));
64
65 % Convertir a Hz
66 frecuencias_en_hz = frecuencias;
67
68 % Índices para cada banda de frecuencias
69 indices_delta = find(frecuencias_en_hz >= 1 & frecuencias_en_hz <= 3);
70 indices_theta = find(frecuencias_en_hz >= 4 & frecuencias_en_hz <= 7);
71 indices_low_alpha = find(frecuencias_en_hz >= 8 & frecuencias_en_hz <= 9);
72 indices_high_alpha = find(frecuencias_en_hz >= 10 & frecuencias_en_hz <= 12);
73 indices_low_beta = find(frecuencias_en_hz >= 13 & frecuencias_en_hz <= 17);
74 indices_high_beta = find(frecuencias_en_hz >= 18 & frecuencias_en_hz <= 30);
75 indices_low_gamma = find(frecuencias_en_hz >= 31 & frecuencias_en_hz <= 40);
76 indices_high_gamma = find(frecuencias_en_hz >= 41 & frecuencias_en_hz <= 50);
77
78
79 % Guardar los índices en un archivo de texto
80 writematrix(magnitud_fft(indices_delta), 'indices_delta.txt');
81 writematrix(magnitud_fft(indices_theta), 'indices_theta.txt');
82 writematrix(magnitud_fft(indices_low_alpha), 'indices_low_alpha.txt');
83 writematrix(magnitud_fft(indices_high_alpha), 'indices_high_alpha.txt');
84 writematrix(magnitud_fft(indices_low_beta), 'indices_low_beta.txt');
85 writematrix(magnitud_fft(indices_high_beta), 'indices_high_beta.txt');

```

Ilustración 21. Código Matlab índices de frecuencias

Fuente: Elaboración Propia

Esta variable luego se dividió por n para calcular la magnitud y se utiliza la función 'abs' para obtener valores absolutos y almacenarlos en la variable 'magnitud_fft'.

Debido a la naturaleza simétrica del espectro producido por la FFT, las frecuencias negativas fueron redundantes por lo cual son descartadas antes de continuar con la conversión a HZ los cuales se obtienen dividiendo el rango de frecuencias por la longitud de la señal y por la frecuencia de muestreo. Una vez obtenidas las frecuencias, Se definen los índices para cada banda de frecuencias de interés, como delta, theta, alfa bajo, alfa alto, beta bajo, beta alto, gamma bajo y gamma alto. Luego estos datos se guardan en un archivo de texto para su posterior análisis (Ilustración 24).

```

79 % Guardar los índices en un archivo de texto
80 writematrix(magnitud_fft(indices_delta), 'indices_delta.txt');
81 writematrix(magnitud_fft(indices_theta), 'indices_theta.txt');
82 writematrix(magnitud_fft(indices_low_alpha), 'indices_low_alpha.txt');
83 writematrix(magnitud_fft(indices_high_alpha), 'indices_high_alpha.txt');
84 writematrix(magnitud_fft(indices_low_beta), 'indices_low_beta.txt');
85 writematrix(magnitud_fft(indices_high_beta), 'indices_high_beta.txt');
86 writematrix(magnitud_fft(indices_low_gamma), 'indices_low_gamma.txt');
87 writematrix(magnitud_fft(indices_high_gamma), 'indices_high_gamma.txt');
88
89 % Amplitudes para cada banda de frecuencia
90 amplitudes_bandas = [sum(magnitud_fft(indices_delta, :), 1);
91 sum(magnitud_fft(indices_theta, :), 1);
92 sum(magnitud_fft(indices_low_alpha, :), 1);
93 sum(magnitud_fft(indices_high_alpha, :), 1);
94 sum(magnitud_fft(indices_low_beta, :), 1);
95 sum(magnitud_fft(indices_high_beta, :), 1);
96 sum(magnitud_fft(indices_low_gamma, :), 1);
97 sum(magnitud_fft(indices_high_gamma, :), 1)];
98
99 % Subplot para la magnitud de la FFT
100 subplot(2, 1, 2);
101 plot(frecuencias_en_hz, magnitud_fft);
102 title('Magnitud de la FFT');
103 xlabel('Frecuencia (Hz)');
104 ylabel('Magnitud');
105
106 % Mostrar los índices de las bandas de frecuencias
107 hold on;
108 plot(frecuencias_en_hz(indices_delta), magnitud_fft(indices_delta), 'ro');
109 plot(frecuencias_en_hz(indices_theta), magnitud_fft(indices_theta), 'b');
110 plot(frecuencias_en_hz(indices_low_alpha), magnitud_fft(indices_low_alpha), 'bo');
111 plot(frecuencias_en_hz(indices_high_alpha), magnitud_fft(indices_high_alpha), 'co');
112 plot(frecuencias_en_hz(indices_low_beta), magnitud_fft(indices_low_beta), 'mo');
113 plot(frecuencias_en_hz(indices_high_beta), magnitud_fft(indices_high_beta), 'yo');
114 plot(frecuencias_en_hz(indices_low_gamma), magnitud_fft(indices_low_gamma), 'ko');
115 plot(frecuencias_en_hz(indices_high_gamma), magnitud_fft(indices_high_gamma), 'po');
116 legend('FFT', 'Delta (1-3Hz)', 'Theta (4-7Hz)', 'Low Alpha (8-9Hz)', 'High Alpha (10-12Hz)', 'Low Beta (13-17Hz)', 'High Beta (18-30Hz)', 'Low Gamma (31-40Hz)',
117 'hold off;');
118
119

```

Ilustración 22. Parte final del código Matlab de FFT

Fuente: Elaboración Propia

Para calcular las amplitudes de cada banda de frecuencia, se suman las magnitudes de la FFT en los índices de cada banda de frecuencia. Finalmente se crea otro subplot y en él se trazan las magnitudes de la FFT en función de las frecuencias que fueron convertidas a Hz. Para este último subplot también se definieron los índices que indican el rango de frecuencia en el cual se encuentran cada una de las ondas analizadas (Ilustración 25).

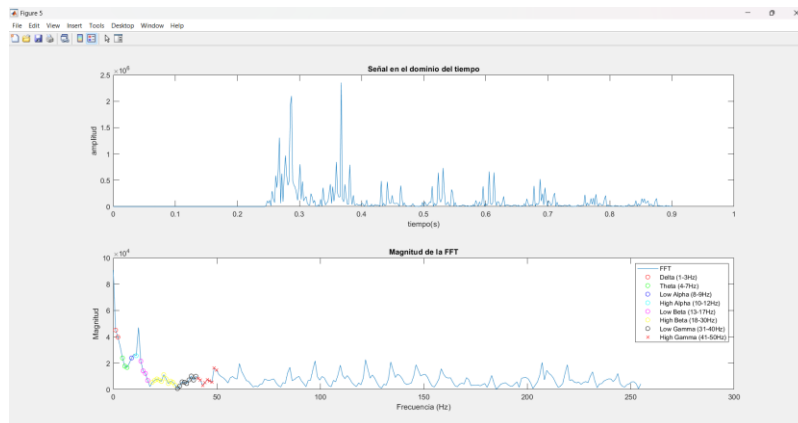


Ilustración 23. Sujeto 1 Señal en el dominio del tiempo y transformada de Fourier

En el siguiente código de Matlab, Se comenzó definiendo la variable "archivos_excel" el cual esta referenciado a la hoja de Excel especifica en la cual se guardaron los datos brutos utilizados en el código anterior, pero definiendo que cada línea es un segundo, de igual forma se definió la hoja especifica en la cual los datos estarían dentro del archivo de Excel.

Se utilizó la función 'readmatrix' para leer los datos en el Excel y se especifica exactamente en qué casillas se encuentran los datos que se deberán almacenar en la variable "data". Los valores del tiempo se extraen de la primera columna con "data(:,1)" y los valores de las bandas de frecuencia se extraen de las columnas restantes con "data(:,4:end)" (Ilustración 26).

```

18
19 % File path to the Excel file
20 %K56 segundos
21 archivo_excel = 'C:\Users\krisn\Documents\PROYECTO DE INVESTIGACION\Matlab\kaidatos2.xlsx';
22 hoja_datos = 'Sheet1';
23
24
25 % File path to the Excel file
26 %archivo_excel = 'C:\Users\krisn\Documents\PROYECTO DE INVESTIGACION\Matlab\kaidatos1.xlsx';
27 %hoja_datos = 'Hoja1';
28
29
30
31 % Load data from Excel file
32 data = readmatrix(archivo_excel, 'Sheet', hoja_datos, 'Range', 'A2:K76');
33
34 % Extract time values (assuming it's in the first column)
35 time = data(:, 1);
36
37 % Extract EEG frequency band values
38 eeg_values = data(:, 4:end); % Extracting EEG frequency band values from the 2nd to last column
39
40 % Define channel names and colors
41 channel_names = {'Delta', 'Theta', 'Low Alpha', 'High Alpha', 'Low Beta', 'High Beta', 'Low Gamma', 'High Gamma'};
42 channel_colors = {'y', 'r', 'm', 'c', 'b', 'g', 'w', 'k'}; % Using MATLAB predefined colors
43
44 % Plot EEG frequency bands over time
45 figure;
46
47 for i = 1:size(eeg_values, 2)
48 subplot(4, 3, i); % Adjust the subplot layout according to your preference
49 bar(time, eeg_values(:, i), 'FaceColor', channel_colors{i});
50 xlabel('Time');
51 ylabel('Power');
52 title(channel_names{i});
53 end
54
55 sgtitle('EEG Frequency Bands Over Time');
56
--

```

Ilustración 24. Código de Matlab visualización de las ondas de frecuencia en el tiempo de duración del entrenamiento

Fuente: Elaboración Propia

Luego de esto se definen los nombres de cada banda de frecuencia y se le asigna un color a cada una el cual será utilizado al momento de trazar la gráfica. Se creó una figura que contendría todas las gráficas y se utiliza el bucle "for" para crear una subgráfica para cada banda de frecuencia. Luego, se trazó un gráfico para mostrar la potencia de la banda de frecuencia EEG utilizando "bar" y finalmente se agregan las etiquetas y los títulos (Ilustración 27).

Dentro del Plot, para definir si es mayor o menor la magnitud, se consideran los valores del Mindflex, que mide la actividad eléctrica en micro voltios con sensores EEG para detectar los biopotenciales generados por la actividad cerebral. El rango de los valores numéricos que recibe el Arduino, y captura las diferentes intensidades de la actividad de las ondas, negativos y positivos, representan dirección de la actividad eléctrica, los valores negativos indican una disminución de la potencia y los valores positivos un aumento dentro de cada banda de EEG, así se define si está elevándose o bajando la señal.

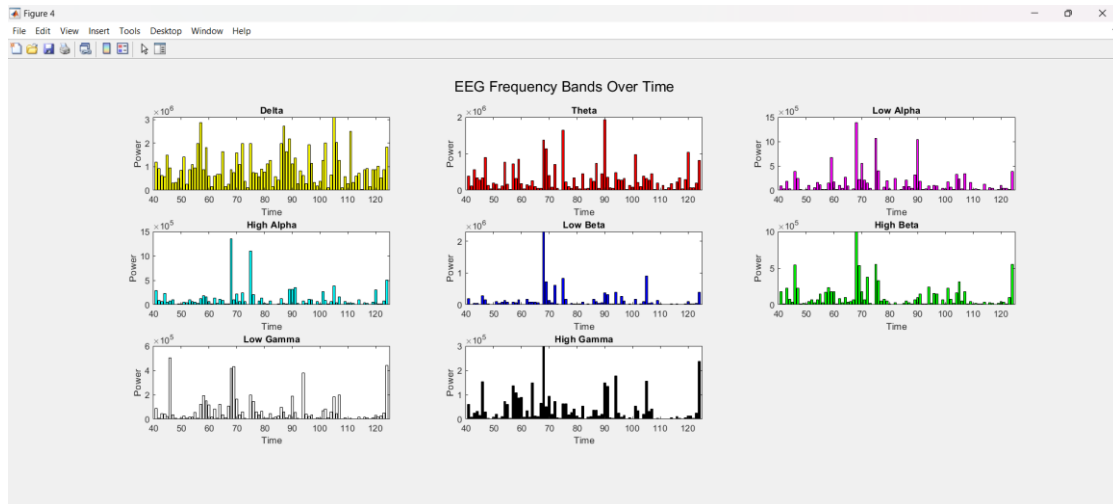


Ilustración 25. Comportamiento de las ondas en el tiempo

Fuente: Elaboración Propia

5.3.4.2. Evaluación comparativa del comportamiento de las ondas cerebrales

Con la ayuda del software Matlab se llevaron a cabo las evaluaciones comparativas del comportamiento de cada una de las ondas cerebrales en los sujetos de prueba canino. Tomando en cuenta las señales de EEG que aportaron información importante para la comprensión durante el adiestramiento canino, en cuanto a qué estado mental están asociadas cada una de ellas (Ayora, 2021), con el fin de comprender emocionalmente al can en el análisis de su desempeño (Tabla 15).

Tabla 15. Ondas de EEG relevantes en el estudio para análisis

Ondas EEG	Asociación relevante
Low Alpha (8-9Hz)	Estado relajado, pero alerta mentalmente
High Alpha (10-12Hz)	Estado más enfocado y atento de la mente
Low Beta (13-17Hz)	Asociadas con el pensamiento activo, resolución de problemas, toma de decisiones.
High Beta (18-30Hz)	Relacionadas con la actividad mental intensa, estrés y ansiedad
Low Gamma (31-40Hz)	Relación con el procesamiento cognitivo, la memoria y la percepción elevada
High Gamma (41-50Hz)	Asociadas con las funciones cognitivas avanzadas y el aprendizaje.

Fuente: Elaboración Propia

Para la implementación del método de visualización y posterior análisis de las ondas cerebrales mediante graficas en Matlab, se tomó en cuenta el tiempo del

entrenamiento de los perros y los segundos en los que se les brindó un comando o serie de comandos para observar su reacción cerebral en cada una de las ondas relevantes.

Al haber obtenido los datos necesarios en Excel para el procesamiento en Matlab, se identificaron y extrajeron las diferentes bandas de frecuencia de interés, como las mencionadas anteriormente. En Matlab se consideraron todos los canales de entrada de los datos, pero en el análisis se utilizaron las ondas cerebrales asociadas con el comportamiento durante el adiestramiento (Tabla 14).

Posteriormente, se crearon gráficas para visualizar la actividad cerebral de cada una de estas bandas de frecuencia a lo largo del tiempo de entrenamiento. Estas gráficas representaron la magnitud de las ondas cerebrales y sus índices de frecuencia en los puntos más altos de dichas ondas de EEG. La visualización de estas ondas proporcionó una comprensión más clara de la respuesta cerebral de los canes a los diferentes estímulos, lo que podría ser útil para ajustar las estrategias de entrenamiento y mejorar el rendimiento en tareas específicas.

En el primer sujeto de prueba, su nivel de entrenamiento se definió de moderado a alto, se realizaron los comandos en una sesión de entrenamiento de 1 minuto 50 segundos. Previo a la toma de datos con el prototipo, se realizaron sesiones de prueba sin el prototipo, solamente utilizando el soporte de cabeza, un gorro para la ansiedad en los perros (Ilustración 28), para asegurar la comodidad del can cuando se hiciera uso del dispositivo.



Ilustración 26. Sujeto 1 pruebas preliminares a la adquisición de datos

Fuente: Elaboración Propia

En la sesión de adquisición de datos, no se presentó problema con la adaptación del dispositivo con el estado de ánimo del perro en su colocación, el soporte de cabeza se siguió utilizando como una ayuda para sostener dentro el prototipo mientras se hacía la captura de los datos (Ilustración 29). Se realizó una sesión cerca de 2 minutos para segmentar los espacios donde se le dieron los comandos. Y, cabe agregar, para evitar la sobre estimulación en el perro, así las señales pudieran ser lo más reales posibles. Se optó por utilizar comandos con los cuales los canes ya estaban familiarizados y con los que se sintieran lo más cómodos posible (Tabla 16).



Ilustración 27. Sesión Sujeto 1 entrenado

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16. Comandos utilizados en las sesiones de adiestramiento

Comandos	Acción
"sit"	Sentarse
"down"	Al suelo
"up"	Arriba (pararse en las patas traseras)
"speak"	Ladrar
"stay"	No moverse (esperar)

Fuente: Elaboración Propia

En las gráficas proporcionadas por Matlab de la sesión de entrenamiento del primer sujeto de prueba se pudo visualizar dentro del tiempo en el que se le brindaron los comandos de "sit", "down" y "stay", siendo estos del segundo 50 al minuto y 40 segundos, las ondas Low Alpha y High Alpha asociadas con el estado alerta de la mente y la atención, se encontraron en magnitudes elevadas. La onda Low Beta, relacionada con la resolución de problemas y la toma de decisión tuvo dos picos altos dentro del tiempo en que recibió el comando. La onda High Beta del estrés y la ansiedad también tuvo un pico alto, pero mostrando valores menores en comparación a las otras ondas cerebrales. Las ondas Low Gamma y High Gamma asociadas con el procesamiento cognitivo la memoria y el aprendizaje, también tuvieron una reacción notoria en el segundo 68 de la sesión de entrenamiento (Ilustración 30).

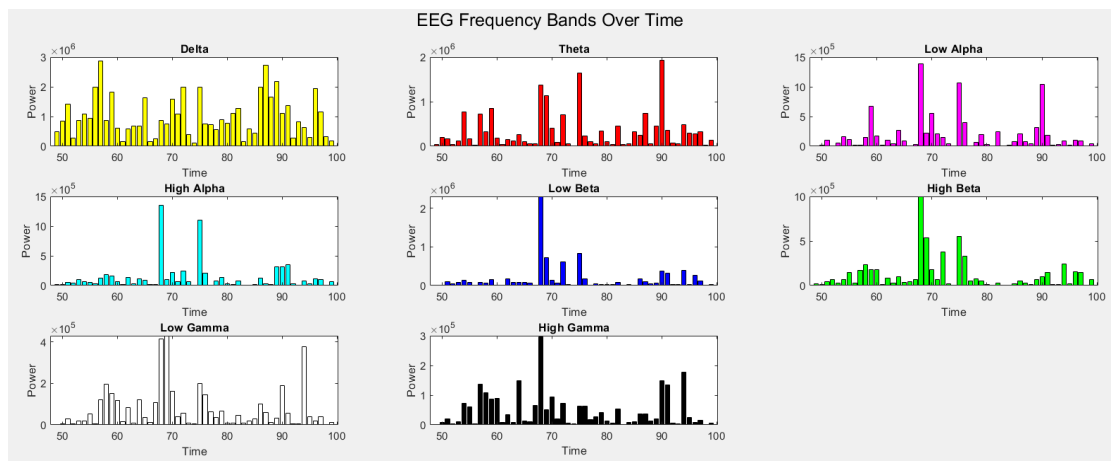


Ilustración 28. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 1 Entrenado

Fuente: Elaboración Propia

En la evaluación del segundo sujeto de prueba, con una edad de 5 años 4 meses, siendo el mayor de los canes, tomó un poco más de tiempo el que se adaptara a la utilización del prototipo sobre la cabeza. El sujeto 2 al ser uno de los sujetos no entrenados, no prestó atención a los comandos y se distrajo fácilmente. Los comandos se le dieron en una sesión de 50 segundos. Dentro del segundo 10 al segundo 30, se realizó el comando más sencillo de "sit" o "sentarse", el cual no comprendió.

Se pudo observar cómo la onda Low Alpha, asociada con el estado alerta de la mente del can se encontró baja en comparación con el Sujeto 1. Esto concordó con el estado del Sujeto 2 en el momento de su entrenamiento, ya que se percibió distraído y no atento a los comandos. Las ondas Low Beta, relacionadas con la toma de decisiones

se encontraba dispersa, no hubo un punto definido donde el can tomará una decisión o indicio de comprensión. Las ondas Low Gamma y High Gamma asociadas con el procesamiento cognitivo y el aprendizaje se pudieron visualizar bajas dentro del proceso de comandos en el entrenamiento (Ilustración 31).

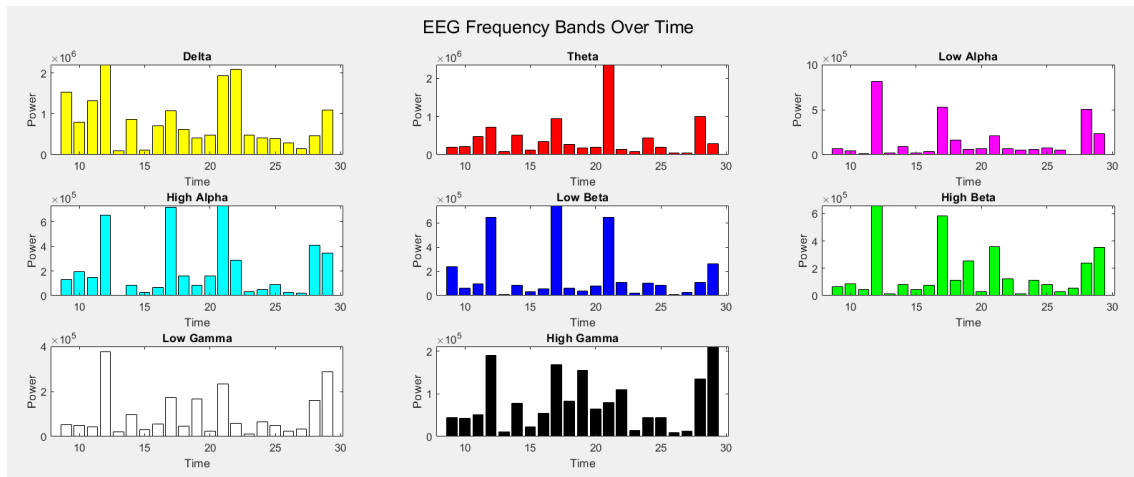


Ilustración 29. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 2 No Entrenado

Fuente: Elaboración Propia

Durante la sesión de entrenamiento del Sujeto 3, tuvo una duración de 76 segundos, siendo el tiempo más relevante del segundo 40 al segundo 60, en donde se le dieron los comandos "sit", "down", "speak" y "up" (Ilustración 32). El nivel de entrenamiento del sujeto 3 se consideró alto, y al contar con 2 años 5 meses de edad, su comportamiento fue el más óptimo.

El comportamiento de la onda Low Alpha, relacionada con el estado de alerta se visualizó bajo durante esta etapa, pero la onda High Alpha, que se enfoca en un estado enfocado y atento, sí tuvo más actividad durante los comandos. Una de las ondas más importantes en el análisis, Low Beta, siendo esta la encargada de reflejar la actividad cerebral en la toma de decisiones y pensamiento activo, sí hubo un cambio en las señales a la hora de captar los comandos. Los valores elevados sugirieron participación en las tareas cognitivas. En las ondas Low Gamma y High Gamma, los valores más altos pudieron indicar un mayor procesamiento cognitivo, siendo el entrenamiento un proceso de aprendizaje, se pudo observar un cambio significativo en las ondas cerebrales en ese preciso momento (Ilustración 33). (Observar anexos en p. 105).



Ilustración 30. Comandos en Sujeto 3 Entrenado

Fuente: Elaboración Propia

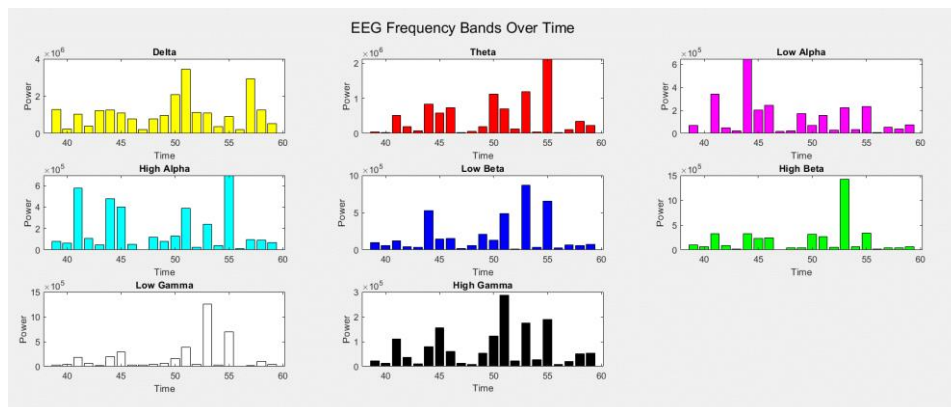


Ilustración 31. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 3 Entrenado

Fuente: Elaboración Propia

En la sesión de entrenamiento del 4to Sujeto de prueba, su nivel de entrenamiento era bajo, al solo entender el comando de "sit" en pocas ocasiones. Su sesión duró 40 segundos, el comando "sit" se le dio entre los segundos 10 y 30. Sus ondas Low Alpha visualmente se percibieron bajas, el can se encontraba relajado durante el entrenamiento, considerando que cada perro estuvo en un entorno donde se sentía familiarizado y con sus entrenadores o dueños. Las ondas Low Beta asociadas con el pensamiento activo y la toma de decisiones, tuvieron un incremento cuando el can recibía los comandos, indicando que su enfoque estaba en la voz del entrenador. Las

ondas Low Gamma, por otro lado, presentó valores decrecientes estando estas asociadas a la memoria y al proceso cognitivo (Ilustración 34).

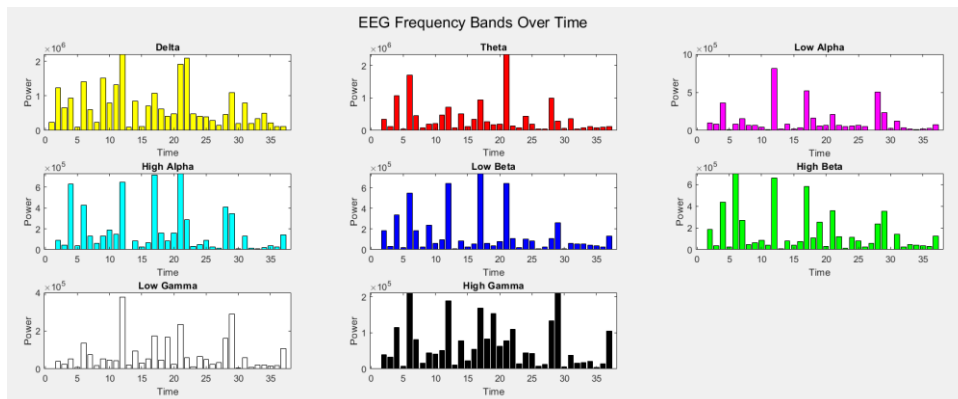


Ilustración 32. Magnitud de las ondas cerebrales en el tiempo Sujeto 4 No Entrenado

Fuente: Elaboración Propia

Con la ayuda de la Transformada Rápida de Fourier, se pudo apreciar cuales eran las bandas de frecuencia que tuvieron una mayor magnitud durante el periodo de tiempo en el que se le daban los comandos a los perros entrenados y no entrenados (Ilustración 35).

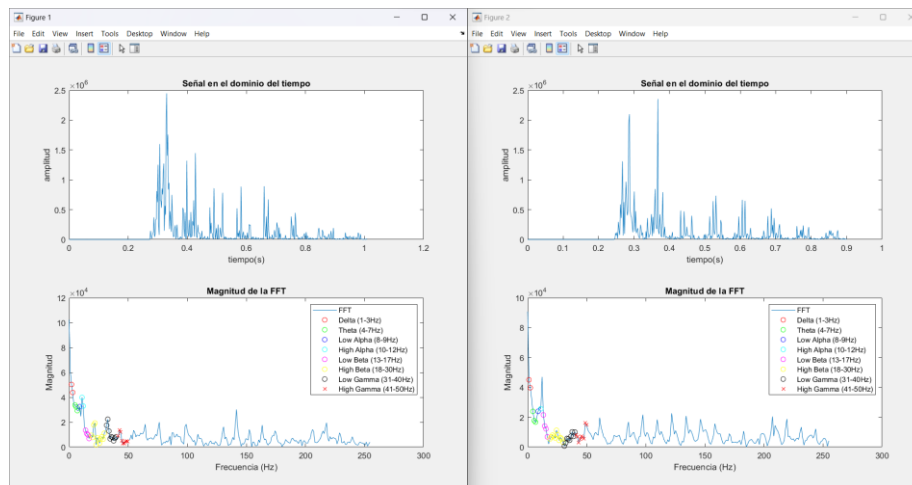


Ilustración 33. Bandas de frecuencia en perro entrenado y no entrenado (Sujeto 1 vs Sujeto 2)

Fuente: Elaboración Propia

En el Sujeto 1 entrenado se notaron magnitudes más predominantes en las ondas Low Alpha, Low Beta y High Gamma, enfocándose en estas por su relevancia en el análisis del comportamiento de las mismas en el entrenamiento. Se evidenció que, en la onda

Low Alpha en el sujeto 1 resultó en mayor magnitud en el momento en el que se le daban los comandos, indicando que se encontró enfocado durante el procedimiento, con un índice de frecuencia de la señal en 10 Hz. El sujeto 2 obtuvo la magnitud de la onda Low Alpha mucho menor y con un índice en la frecuencia de 9 Hz, esto debido a su falta de enfoque en el adiestramiento. Las ondas Low Beta y High Gamma, haciendo referencia a la toma de decisiones y al aprendizaje, en el Sujeto 1 fueron menores, oscilando de 15 Hz a 51 Hz, y el Sujeto 2 su magnitud fue mayor en las ondas Low Beta y High Gamma, indicando que al recibir los comandos su estado mental fue de un pensamiento activo elevado, pero, por otro lado, sus índices de frecuencia oscilando de 13-46 Hz, menor que en el Sujeto 1 (Tabla 17).

Tabla 17. Magnitud Ondas Cerebrales Sujeto 1 vs Sujeto 2

Sujeto	Onda	Magnitud	Índices de frecuencia
Sujeto 1	Low Alpha (enfoque)	32499.5	10 Hz
	Low Beta (Toma de decisiones y pensamiento activo)	13547.7	15-18 Hz
	High Gamma (aprendizaje)	13559.4	43-51 Hz
Sujeto 2	Low Alpha	23955.6	9 Hz
	Low Beta	21500.8	13-16 Hz
	High Gamma	16144.05	38-46 Hz

Fuente: Elaboración Propia

5.3.5. ESTADÍSTICA EN MINITAB PERROS ENTRENADOS Y NO ENTRENADOS

Con la ayuda de Minitab, se proporcionó una serie de estadísticas importantes aplicadas para el análisis de las diferencias significativas entre los grupos de la muestra del estudio. Se optó por un Análisis de Varianza (ANOVA), brindando categorías de "factor" y "error" determinando las variaciones entre los grupos. El objetivo del ANOVA es determinar si las diferencias entre las medias de los grupos son estadísticamente significativas en comparación con la variabilidad dentro de los grupos.

En Minitab, al realizar los gráficos comparativos, se decidió realizar la comparación entre Sujeto 1 (entrenado) vs. Sujeto 2 (no entrenado) y Sujeto 3 (entrenado) vs. Sujeto 4 (no entrenado), tomando en cuenta que tanto los Sujetos de prueba 1 y 2, y los Sujetos de prueba 3 y 4, han crecido juntos y se desarrolló el proceso de adiestramiento en un entorno seguro para ellos, con el fin de mantener los resultados lo más reales posible.

El modelo de varianza realizado con ANOVA para el Sujeto 1 vs Sujeto 2, evaluando la onda Low Beta y High Gamma, por su relevancia en el pensamiento activo, estado de toma de decisiones y aprendizaje (Tabla 18).

Tabla 18. Análisis de Varianza Sujeto 1 vs Sujeto 2

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	4778.3	1592.78	2.66	0.073
Error	22	130.0	5.91		
Total	25	4908.3			

Fuente: Elaboración Propia

La "Suma de Cuadrados Ajustada (SC Ajust.)" representó la cantidad total de variabilidad en los datos, que ha sido ajustada para tener en cuenta las diferencias entre los grupos. Cuando se observó la suma de cuadrados ajustada para la fuente "Factor", que es de 4778.3, se enfocó en la variabilidad que existe entre los grupos. Por otro lado, la suma de cuadrados ajustada para la fuente "Error", que es de 130.0, mostró la variabilidad que está presente dentro de los grupos.

La "Media de Cuadrados Ajustada (MC Ajust.)" es una medida que nos indica la variabilidad promedio, ya sea entre los grupos o dentro de los grupos. Se calcula dividiendo la suma de cuadrados ajustada por los grados de libertad correspondientes.

Cuando se visualizó la Fuente "Factor" y su MC Ajust., que fue de 1592.78, esto detalló que, en promedio, la variabilidad entre los grupos es de aproximadamente 1592.78. Por otro lado, para la Fuente "Error", su MC Ajust. fue de 5.91, lo que sugiere que la variabilidad dentro de los grupos es de aproximadamente 5.91 en promedio.

El "Valor F", se refiere a la relación de la variabilidad dentro de los grupos, en este caso fue de 2.66, esto indicó que las diferencias entre los grupos fueron más notorias que dentro de los grupos.

En el estudio se presentó de manera detalla las medias y desviaciones estándar asociadas con perros entrenados y no entrenados, y el comportamiento de sus ondas cerebrales, resultó ser un elemento para la comprensión de las magnitudes y respuestas de las ondas cerebrales en el adiestramiento canino.

El resumen del modelo elaborado mediante ANOVA en Minitab (Tabla 19), proporcionó una visión general de cómo se ajustó el modelo estadístico a los datos y cómo se distribuyó la variabilidad en los diferentes componentes del modelo. "S" representó el error estándar de la estimación, siendo este de 4716.93, una medida de la variabilidad de los datos alrededor de la línea de regresión. Entre menor sea "S", mejor sería el ajuste del modelo a los datos.

El R-cuadrado se detalló la medida de cuánta variabilidad en la variable de respuesta fue explicada por el modelo, detallando un valor del 14.9%. Indicó la proporción de la variabilidad total en la variable de respuesta que fue explicada por los predictores incluidos del modelo. Un valor cercano a 1 indicaría un mejor ajuste del modelo de los datos.

El R-cuadrado ajustado, una versión ajustada del R-cuadrado, dando un valor de 0.72%, tomó en cuenta el número de predictores en el modelo y el tamaño de la muestra, también, un valor cercano a 1 indica un mejor ajuste del modelo. Finalmente, el R-cuadrado (pred), en este caso de 0.00%, midió la capacidad predictiva del modelo, indicando cuánta variabilidad había en la variable de respuesta donde pudo explicarse

por los predictores en el modelo cuando se aplican a nuevos datos no utilizados en la construcción del modelo.

Tabla 19. Resumen del Modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
4716.93	14.90%	0.72%	0.00%

Fuente: Elaboración Propia

Detallar las medias (Tabla 20) proporcionó una visión clara del valor promedio de las variables de las ondas cerebrales tomadas en cuenta para el análisis, Beta y Gamma, siendo estas las más relevantes en cuanto proceso cognitivo y aprendizaje. Esto no solo facilitó la comparación entre grupos, sino que también permitió evaluar la variabilidad y consistencia de los datos dentro de cada grupo. El incluir la desviación estándar de las mismas, se brindó información adicional sobre la dispersión de los datos alrededor de las medias, lo que ayudó entender mejor la variabilidad de cada grupo y la precisión de las estimaciones de las medias.

Tabla 20. Medias de los grupos

Grupo	N	Media Low Beta	Media High Gamma	Desv.Est	IC de 95%
Sujeto 1 Entrenado	4	10233	6560	2780/3976	(5381, 15085)
	9				(3325, 9794)
Sujeto 2 No Entrenado	4	13652	8206	6064/4410	(9895, 17409)
	9				(5701, 10711)
Sujeto 3 Entrenado	5	8836	5570	5868/1645	(5279, 12392)
	9				(2919, 8221)
Sujeto 4 No Entrenado	3	11458	7410	4592/2912	(8736,14298)
	9				(5236, 11892)

Fuente: Elaboración Propia

En el Sujeto 1, se identificó una media en la onda Low Beta de 10233, acompañado de una desviación estándar de 2780, y un intervalo de confianza del 95%

que osciló entre 5381 y 15085. Y en la onda High Gamma tuvo una media de 6560, con una desviación estándar de 3976, oscilando en el intervalo de confianza de 95% de 3325 a 9794. Estos resultados ofrecieron una perspectiva clara sobre la medida central y la dispersión de los datos dentro de esos datos en particular.

En cuanto al Sujeto 2, no entrenado, se registró una media de 13652 y una desviación estándar de 8206, con un intervalo de confianza del 95% que se situó entre 9895 y 17409 en la onda Low Gamma, en la onda High Gamma fue una media de 8206.

El Sujeto 3, entrenado, tuvo una media en Low Beta de 8836 y en High Gamma de 5570, con una desviación estándar de 5868 en la onda Low Beta y 1645 en High Gamma, en un intervalo de confianza del 95% de 5279 a 12392 y 2919 a 8221.

Finalmente, el sujeto 4, no entrenado, obtuvo una media de 11458 en Low Beta y 7440 en High Gamma, con una desviación estándar de 4592 y 2912 respectivamente, con un índice de confianza del 95% variando de 8736 a 14298 y 5236 a 11892. Los perros no entrenados presentaron en conjunto una media más alta que la de los perros entrenados.

El gráfico comparativo (Ilustración 36) de Sujeto 1 (perro entrenado) y Sujeto 2 (perro no entrenado), en cuanto a magnitud de la onda Low Beta, relacionada con el pensamiento activo, toma de decisiones y resolución de problemas, mostró como el sujeto de prueba entrenado (Sujeto 1), mostró valores más bajos de la magnitud de la onda, lo que se vio reflejado en su estado de atención, ya que se encontró concentrado y comprendió los comandos correctamente durante el entrenamiento, esto provocando valores estables en la onda Low Beta. Por otro lado, el perro no entrenado, presentó una magnitud más alta de esta onda mientras recibía los comandos, lo que se interpretó como que estaba prestando menos atención, es por eso la inestabilidad y respuesta del can en este contexto. Destacando que el Sujeto 2, al ser el no entrenado, difícilmente comprendía lo que se le pedía en los comandos.

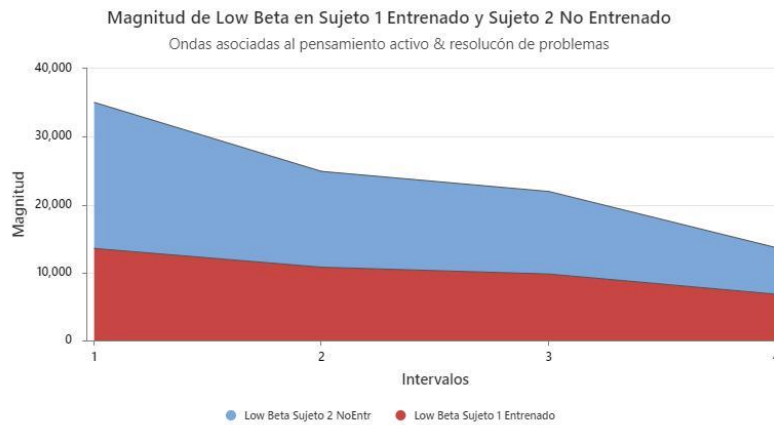


Ilustración 34. Magnitud de Low Beta en Sujeto 1 vs Sujeto 2

Fuente: Elaboración Propia

En el análisis de la onda High Gamma entre el Sujeto 1 vs. el Sujeto 2, utilizando el gráfico de caja, dentro del contexto de magnitud de las ondas durante el periodo de tiempo que los canes recibieron los comandos, se vio reflejado en el Sujeto 1, considerando las medias de las magnitudes, valores menores que en el Sujeto 2 no entrenado. Esto presentó diferencias en la actividad cerebral y la respuesta cognitiva entre los dos grupos (Ilustración 37).



Ilustración 35. Magnitud de la onda High Gamma Sujeto 1 vs. Sujeto 2

Siendo la onda High Gamma asociada con los procesos cognitivos complejos, la percepción sensorial, el procesamiento del lenguaje y la memoria de trabajo, el Sujeto 1 (entrenado) mostró ondas High Gamma más baja en magnitud durante el entrenamiento, se definió que su cerebro al momento de recibir los comandos estuvo funcionando de manera más eficiente, ya que logró completar todas las ordenes que se llevaron a cabo en la sesión, y logró internalizar los comandos, desarrollando estrategias eficientes para el procesamiento de la información recibida.

El Sujeto 2 (no entrenado), por otra parte, mostró valores en las magnitudes de la onda High Gamma altas en comparación con el Sujeto 1 durante su entrenamiento, esto indicó, tomando en cuenta su comportamiento durante la sesión al estar distraído y activo, que se debió a un mayor esfuerzo cognitivo para procesar y comprender los comandos dados, ya que el Sujeto 2 no estaba familiarizado con los mismos.

La magnitud de la onda Low Beta en el Sujeto 3 (perro entrenado) y Sujeto 4 (perro no entrenado), se logró ver una similitud con la comparativa de la onda Low Beta en los Sujetos 1 y 2 (Ilustración 38). En este caso, igualmente, el Sujeto 3 contó con magnitudes inferiores al Sujeto 4 en la onda Low Beta relacionada con la resolución de problemas y el pensamiento activo. Durante el adiestramiento, el Sujeto 3 fue, de los 4 sujetos de prueba, el mejor en cuanto a nivel de entrenamiento y estado de ánimo pasivo, se notó enfocado durante el proceso. Se pudo observar en la comparativa como el Sujeto 4, con magnitudes más altas, se entendió esto como que no estuvo en total enfoque y concentración. El perro entrenado (Sujeto 3), comprendió fácilmente los comandos brindados y su desempeño fue pasivo, esto explica el porqué de las magnitudes inferiores en comparación con el perro no entrenado (Sujeto 4).

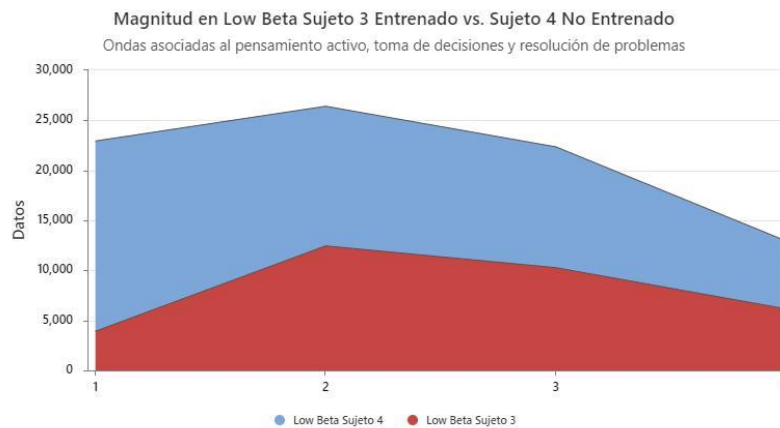


Ilustración 36. Magnitud en onda Low Beta Sujeto 3 vs. Sujeto 4

Fuente: Elaboración Propia

En el análisis de la onda High Gamma, relacionada con el aprendizaje y proceso cognitivo, de los Sujetos 3 y 4, se observaron valores menores del Sujeto 3 en comparación con el Sujeto 4. El Sujeto 3 con una mediana de 5,745.36 en la magnitud de la onda y el Sujeto 4 con una mediana de 6,593.8, haciendo alusión a que el perro entrenado mientras recibía los comandos hubo estabilidad en su onda, esto queriendo

decir que la interiorización de la información recibida por el Sujeto 3 fue eficiente (Ilustración 39). El Sujeto 4, con mayor magnitud de la onda High Gamma, al ser el perro no entrenado, se observó cómo su comportamiento se reflejó en la conducta de la onda, siendo más alta indicando que requirió de una mayor atención o esfuerzo mental al recibir los comandos.

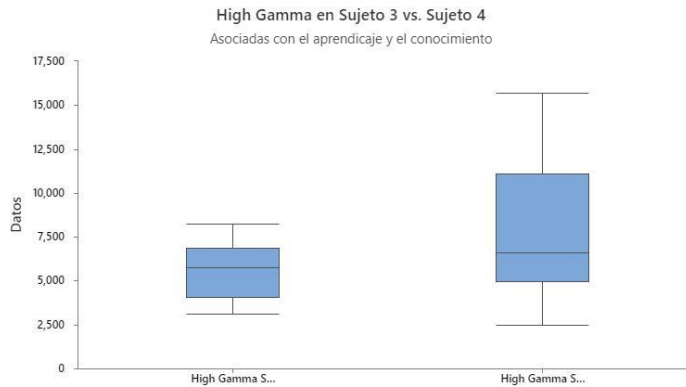


Ilustración 37. Magnitud High Gamma Sujeto 3 vs. Sujeto 4

Fuente: Elaboración Propia

Con ayuda del método estadístico ANOVA, se logró obtener la gráfica de intervalos de los índices de frecuencia de las ondas cerebrales de los perros entrenados facilitando la interpretación de los datos. Los índices de frecuencia oscilaron de 4 a 51 Hz, dentro del rango adecuado para la determinación conductual de la actividad cerebral en perros entrenados. Durante el entrenamiento, se dieron los comandos de "sit", "stay" y "down ", al estar dentro de los rangos adecuado de frecuencia se interpretó como la comprensión eficiente de los comandos por parte del Sujeto 1 (Ilustración 40).

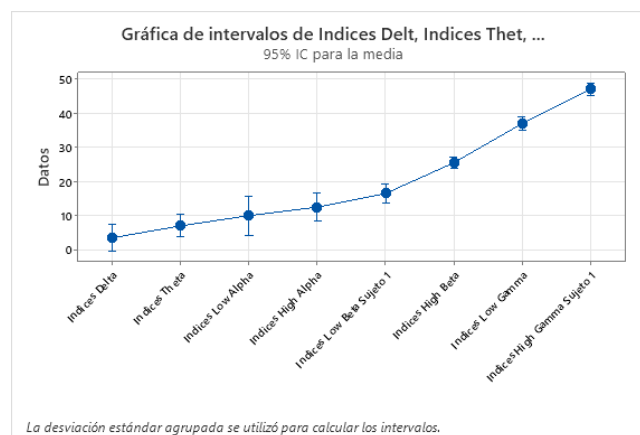


Ilustración 38. Intervalos de Índices de Frecuencia en Sujeto 1 (perro entrenado)

Fuente: Elaboración Propia

Durante la recopilación de los datos de los índices de bandas de frecuencia del Sujeto 2 (no entrenado), se encontró una diferencia notable en los rangos de frecuencia (Hz) desde la onda Delta hasta la onda High Gamma, de 2Hz hasta 46Hz respectivamente (Ilustración 41).

En el Sujeto 1, visto previamente, sus bandas de frecuencia oscilaban de 3Hz a 51Hz, analizando esto, se pudo observar que, en el lapso de tiempo del adiestramiento del Sujeto 2, no realizó ninguno de los comandos recibidos, se encontró distraído y desenfocado, en relación con los índices de frecuencia, al ser valores más bajos se interpretó como la falta de concentración y comprensión en los comandos. En cada una de las bandas hay un cambio disminuyente en la frecuencia, así como en el Sujeto 1, los valores de la frecuencia son más altos, queriendo decir que el can comprendía el proceso de las tareas cognitivas elaboradas.

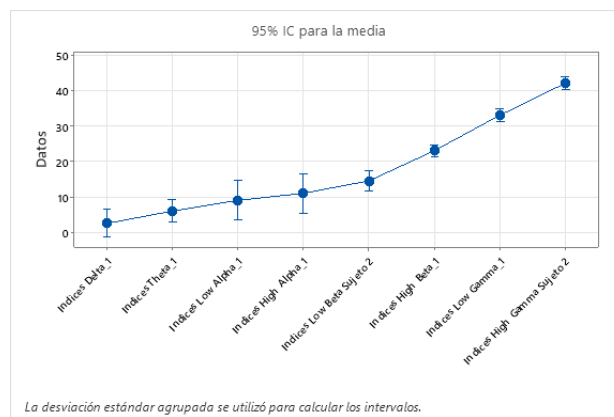


Ilustración 39. Intervalos de índices de frecuencia en Sujeto 2 (perro no entrenado)

Fuente: Elaboración Propia

Dentro del adiestramiento del Sujeto 1 (can entrenado) y Sujeto 2 (can no entrenado), se pudo observar una frecuencia más alta en la onda Low Beta en el Sujeto 1 (Ilustración 42). Una frecuencia más alta en las ondas cerebrales, se asocia con un estado de mayor alerta, enfoque y actividad cognitiva. Así, al observar en el Sujeto 1 una frecuencia más alta en la onda Low Beta, oscilando de 15 – 18 Hz, en comparación con el Sujeto 2, oscilando de 13 – 16 Hz, sugirió que el perro entrenado estaba más comprometido y activo mentalmente durante el tiempo en el que se llevó a cabo la sesión de entrenamiento, esto ayudó a comprender que tan interesados estuvieron los canes durante este procedimiento.

Los índices de frecuencia del can entrenado (Sujeto 1), oscilaron de 43 – 51 Hz, dentro del rango de frecuencia canino, mientras que el del perro no entrenado (Sujeto 2) estuvieron dentro del rango de 38 – 46 Hz, menor frecuencia que en el Sujeto 1, esto indicó diferencias en el proceso cognitivo de los perros, ya que las ondas Gammas están asociadas con la atención sostenida, memoria, aprendizaje y toma de decisiones. Una mayor actividad cerebral se interpreta como una mayor eficiencia durante esos procesos cognitivos.

Se pudo decir que, el perro entrenado en la sesión de entrenamiento, al tener un rango de frecuencia mayor en comparación con el perro no entrenado, estuvo más enfocado con la tarea en cuanto la comprensión y adquisición de información cuando se le dieron los comandos. El Sujeto 2, mostrando un rango de frecuencias menor, llegando a los 46 Hz, indicó que tuvo una menor implicación cognitiva durante el entrenamiento, significando que el can no entrenado encontró más difícil el estado de concentración en los comandos o el procesamiento de la información de manera más efectiva (Ilustración 42).

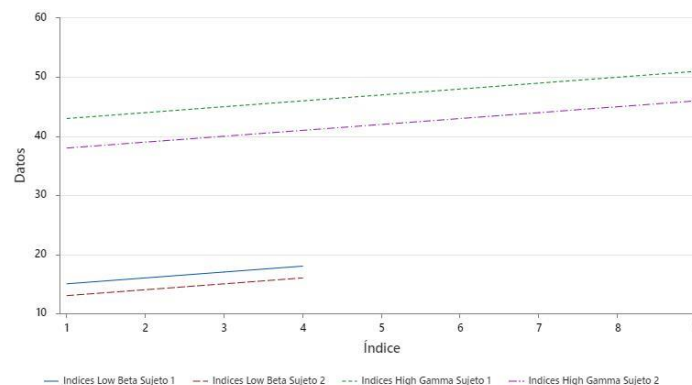


Ilustración 40. Índices de frecuencia en onda Low Beta y High Gamma Sujeto 1 vs Sujeto 2

Fuente: Elaboración Propia

En la evaluación de Minitab dentro de la comparativa del Sujeto 3 (perro entrenado) y Sujeto 4 (perro no entrenado), se pudo visualizar el comportamiento de las ondas de frecuencia de cada onda cerebral en la comparativa de estos dos grupos (Ilustración 42).

El Sujeto 3, perro entrenado específicamente en la tarea de recibir los comandos, exhibió valores de frecuencia de onda cerebral que oscilaban en un rango óptimo de 3

a 60 Hz durante el monitoreo con el dispositivo Mindflex. La amplia gama de frecuencias dentro del espectro EEG indicaba una actividad cerebral saludable y dinámica. Además, se observaron patrones de actividad coherentes y definidos en las distintas bandas de frecuencia, lo que sugiere una capacidad cerebral óptima para procesar información y responder a estímulos externos.

Por otro lado, el Sujeto 4 mostró un perfil de actividad cerebral ligeramente diferente. Aunque también exhibió una variedad de frecuencias en el rango de 2 a 45 Hz, este rango fue notablemente más estrecho en comparación con el Sujeto 3. Esta restricción en el rango de frecuencia indicó una menor variabilidad en la actividad cerebral del Sujeto 4, posiblemente asociada con niveles más bajos de alerta o actividad cognitiva.

El contraste entre los perfiles de actividad cerebral de ambos sujetos resaltó la importancia de la individualidad en la neurociencia animal y destacó la necesidad de considerar las diferencias individuales al interpretar los datos EEG. Además, subrayó el potencial del Mindflex para proporcionar información valiosa sobre el estado mental y emocional de los perros, lo que pudo ser invaluable para entrenadores y propietarios de mascotas interesados en comprender mejor el funcionamiento interno de sus compañeros caninos y adaptar estrategias de entrenamiento y cuidado de manera más efectiva.

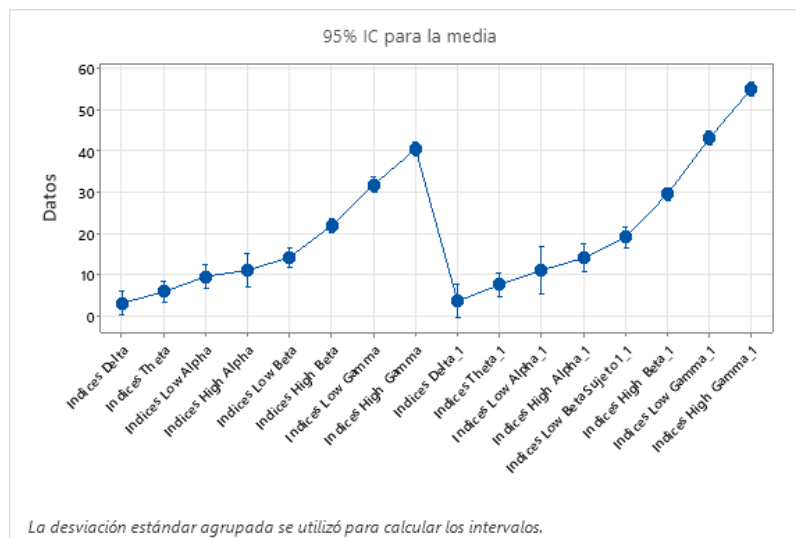


Ilustración 41. Ondas de frecuencia en Sujeto 3 y Sujeto 4

Fuente: Elaboración Propia

Las diferencias entre las frecuencias de las ondas cerebrales en perros entrenados y no entrenados durante la recepción de comandos se definieron en distintos niveles de activación cerebral y procesamiento cognitivo. Los perros entrenados (Sujeto 1 y Sujeto 3), exhibieron frecuencias más altas en las bandas de las ondas cerebrales. Como en la onda High Gamma, durante la recepción de comandos en comparación con los canes no entrenados. Esto sugirió una mayor activación cerebral en los perros entrenados mientras realizaron las tareas cognitivas complejas.

Los valores más altos de frecuencia de ondas cerebrales, especialmente en las bandas asociadas con el proceso cognitivo avanzado, como Low Gamma y High Gamma, en los perros entrenados se vio reflejado como una mayor concentración, enfoque, atención y procesamiento de la información durante el entrenamiento. Por otro lado, los perros no entrenados mostraron una activación cerebral más baja y una menor capacidad para procesar eficientemente los comandos recibidos, esto destacó la importancia del entrenamiento en el desarrollo cognitivo y la respuesta conductual de los perros ante estímulos verbales.

5.4. EFICIENCIA DEL SISTEMA

El sistema desarrollado para el análisis del comportamiento de las ondas cerebrales en canes demostró lo eficiente de su desempeño a través de la integración fluida entre el hardware y el software, las codificaciones en Arduino Ide y Matlab, donde fue posible la adquisición de los datos de los canes de forma inalámbrica sin problemas de interferencias por parte de los movimientos realizados durante las sesiones de entrenamiento, y esto fue beneficioso para el desarrollo fluido de las mismas.

La implementación de los módulos Bluetooth HC-05 en el dispositivo Mindflex y la configuración con ambos Arduinos Uno fue de mucha importancia para establecer una comunicación estable entre el sistema y el Mindflex, que fueron utilizados para la captura de las señales cerebrales. Esta configuración permitió una transmisión efectiva de los datos hacia el software de Arduino Ide, donde se recibían los datos por medio del monitor serial, para luego poder llevarlos a un archivo de texto y posteriormente a un archivo Excel (xlsx) para dar lectura a los mismos desde Matlab. Incluso, cuando los perros

se movían libremente durante las sesiones de entrenamiento no hubo problemas en la captura de los datos.

La principal ventaja de haber diseñado el sistema de forma inalámbrica fue la libertad de movimiento que se otorgó a los canes durante el proceso de recolección de datos, esto siendo necesario para la elaboración de los comandos. Al no depender de cables o conexiones directas físicas, los perros pudieron desplazarse hasta 10 metros de distancia de la computadora central sin que esto afectara la calidad de la señal o la integridad de los datos recolectados. Además, esto también aseguró la comodidad y el bienestar de los canes durante la evaluación cognitiva, lo que contribuyó significativamente a la precisión de los resultados obtenidos.

La capacidad del sistema para adaptarse a los movimientos y comportamientos naturales de los animales resaltó su versatilidad y su potencial para aplicaciones prácticas en el estudio del comportamiento animal y la neurociencia.

5.4.1. TIEMPO DE RESPUESTA DEL SISTEMA

El tiempo de respuesta hace referencia al intervalo de tiempo que transcurrió desde que hubo una conexión establecida entre el Arduino Ide con el Mindflex con la ayuda de la conexión inalámbrica. Esta variable se consideró para su análisis de forma que se comprendiera el nivel de eficiencia del sistema, definiendo el tiempo de respuesta para la captura de señales. De igual manera, el tiempo que le tomó al dispositivo establecer una conexión estable con el Arduino Uno de la computadora.

El enfoque se centró en la mejora de este aspecto de relevancia para el estudio y posteriores estudios, con el objetivo del identificar áreas de oportunidad de mejora que permitan una respuesta más eficiente y más rápida del sistema antes los datos recibidos. El análisis para esta variable que se llevó a cabo fue en los cuatro sujetos de prueba y en el momento de su adiestramiento al establecer una conexión inalámbrica con el dispositivo.

En la Tabla 21, se pudo apreciar visualmente el tiempo de respuesta en cuanto a conexiones inalámbricas y adquisición de datos en el monitor serial del Arduino Ide. De la manera en que se realizó este análisis fue por medio de un cronómetro en el momento

en que se iniciaban las sesiones. No hubo problemas en cuanto a dificultad de conexión entre el dispositivo Mindflex, en las ocho sesiones realizadas se pudo establecer una conexión eficiente, limpia y óptima.

Tabla 21. Tiempo de respuesta del sistema en los sujetos de prueba

Sujeto	Pruebas / Sesión de entrenamiento	Tiempo de conexión inalámbrica (segundos)	Tiempo de visualización de datos (segundos)
Sujeto 1	1	4.8 s	1.3 s
Sujeto 2	1	4.2 s	1.2 s
	2	3.8 s	0.9 s
Sujeto 3	1	3.9 s	1.2 s
	2	4.5 s	1.5 s
Sujeto 4	1	4.6 s	1.8 s
	2	4.3 s	1.2 s
	3	4.6 s	2 s

Fuente: Elaboración Propia

Los valores que tomaba el dispositivo Mindflex y enviaba inalámbricamente al software Arduino IDE, eran reflejados en el monitor serial obteniendo una línea de datos por segundo, estos datos recibidos se obtenían en unidades de micro voltios (μV). Lo cual fue de gran aporte al estudio la visualización del comportamiento de las ondas cerebrales en lapsos de un segundo llevando la información a ser más detallada en intervalos continuos de tiempo. (Tabla 22) La primera sesión del sujeto 1 duró un minuto 59 segundos, donde en ningún momento durante la adquisición de los datos hubo interferencias o valores nulos.

Tabla 22. Tiempo de respuesta del sistema en el Sujeto 1

Tiempo (segundos)	Delta	Theta	Low Alpha	High Alpha	Low Beta	High Beta	Low Gamma	High Gamma	Respuesta
1	2276983	1629983	740671	600573	311436	170756	127523	76221	SI
2	2357821	175140	59987	51088	127531	32073	52169	35480	SI
3	887878	213606	102239	380799	231347	143644	67711	50055	SI
4	1569223	243515	209767	224342	189625	47672	79776	54130	SI
5	684786	39416	19652	31970	18416	13613	22123	10415	SI
6	522549	53177	40444	16881	51192	14918	13828	11930	SI
7	255316	143078	74609	16699	95031	35453	16554	21414	SI
8	767770	118594	24700	36648	17058	21069	27353	38865	SI
9	2027981	344294	322330	99625	150001	78324	67029	27676	SI
10	760124	203228	183647	16145	172391	81352	21379	14378	SI
11	1295346	483146	159750	18199	146759	102155	79925	46337	SI
12	780060	151831	124433	35933	29006	33428	68721	54032	SI
13	755828	8030	5954	6458	5654	6588	1590	459	SI
14	1455901	798050	182199	403392	173350	419263	250647	228281	SI
15	2415028	341153	56742	20035	99591	71921	23434	14667	SI
16	1716160	255110	62446	182876	351712	109354	160016	128090	SI
17	784449	96484	44552	55949	49102	49734	26843	27049	SI
18	969554	110767	67855	53475	39642	78233	64806	63734	SI
19	821880	14222	31256	36959	60784	32766	31473	11820	SI
20	427587	358903	46507	125374	126814	125090	77236	42557	SI
21	1333162	1933595	569939	1034839	240895	436899	262295	85692	SI
22	1034266	209690	310512	738533	763659	670276	247904	61676	SI
23	674353	135136	120456	66569	54036	55393	29217	18869	SI
24	709518	301025	32034	177159	161059	111938	64481	103355	SI
25	184907	39959	29876	24446	33252	37978	37829	26527	SI
26	2066834	32276	23777	34257	19159	22050	25796	10179	SI
27	207769	31569	19852	10292	31958	32995	6524	6589	SI
28	31013	4568	2829	3869	4240	4912	1554	1126	SI
29	499082	122006	26926	13728	25934	37252	5525	4248	SI

Fuente: Elaboración Propia

VI. DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se discutió algunas limitaciones que se presentaron en el estudio, y algunas recomendaciones para investigaciones futuras que se podrían tomar en cuenta.

6.1. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

Si bien el sistema demostró ser efectivo en la captura y el análisis de las ondas cerebrales de los canes, también presentó algunas limitaciones y áreas de mejora que se consideraron en el estudio.

El dispositivo Mindflex contó con un sensor de clip colocado en la oreja izquierda del can, debido a su contacto con el pelo del animal, causó ruido y en perros muy inquietos, se desprendió de la oreja. Esto pudo afectar la calidad de las señales recopiladas, aunque, el sistema pudo capturar las principales bandas de frecuencia de las ondas cerebrales, como Alpha, Beta y Gamma, no fue capaz de medir valores específicos de meditación y atención que podrían ser visualizados en herramientas como Processing. Una mejora potencial sería investigar sobre sensores alternativos o métodos de sujeción que minimicen este problema y mejoren la calidad de la captura de los datos. También, una mejora en este aspecto, podría implicar la incorporación de sensores adicionales que permitan la identificación y el seguimiento de los estados mentales específicos como los mencionados anteriormente de Meditación y Atención.

Aunque Matlab fue utilizado con éxito para el análisis de datos, se podría explorar la integración con otras plataformas de visualización, como Processing o por medio de Python, para aprovechar sus capacidades de representación gráfica, y en cuanto a Processing, su capacidad de visualización interactiva. Esto podría mejorar la interpretación de los datos y facilitar la comunicación de los resultados a través de representaciones visuales más intuitivas.

El aumento de la muestra puede ser un factor de mejora en estudios posteriores sobre el análisis de señales utilizando un prototipo como este. Incluir una gama más amplia de canes en el estudio, que abarque diferentes razas, edades, tamaños y niveles de entrenamiento, puede ayudar a garantizar que los resultados obtenidos sean más

representativos de población canina en general. Esto también, puede proporcionar un aumento en la robustez estadística de los resultados.

A pesar de que la comunicación inalámbrica entre los dispositivos fue fundamental para permitir el libre movimiento de los canes durante las sesiones de entrenamiento, existen oportunidades de mejora para la optimización del diseño y velocidad de la transmisión de los datos. Implicando la exploración de tecnologías inalámbricas más avanzadas o la optimización de los protocolos de comunicación existentes, mejorando la eficiencia y la confiabilidad del sistema.

VII. CONCLUSIONES

1. Se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de estudios científicos previos relacionados con el procesamiento de señales EEG en animales. Estos estudios han empleado una variedad de herramientas y métodos para registrar y analizar las señales cerebrales en diversas especies animales. Entre los métodos utilizados se encontraron el uso de electrodos, amplificadores y software especializado para el procesamiento y análisis de las señales EEG.
2. Se ha desarrollado un diseño aplicable utilizando el Arduino UNO como interfaz de comunicación para capturar y visualizar las señales cerebrales. Este diseño incluyó el montaje de conexiones específicas, programación del microcontrolador y la implementación de software para interpretar y mostrar las señales EEG de manera clara y comprensible.
3. Se ha creado un prototipo práctico utilizando el chip Neurosky del dispositivo Mindflex, con el objetivo de ofrecer una opción asequible para entrenadores y dueños de mascotas interesados en analizar las respuestas cerebrales de los perros. Este prototipo permitió la captura y visualización de señales EEG de forma accesible y efectiva, facilitando el análisis de las respuestas cerebrales durante el entrenamiento.
4. Se han obtenido y analizado las señales cerebrales de dos perros entrenados y dos no entrenados utilizando el prototipo desarrollado. Después de realizar comandos de entrenamiento específicos, se utilizaron herramientas estadísticas como Minitab para comparar y evaluar las respuestas cerebrales en los cuatro sujetos de prueba. Este análisis proporcionó información importante sobre las diferencias en las respuestas cerebrales entre perros entrenados y no entrenados, contribuyendo al desarrollo y refinamiento de técnicas de entrenamiento basadas en EEG.

VIII. REFERENCIAS

- Kumar, P., Abubakar, A. A., Ahmed, M. A., Hayat, M. N., Ajat, M., Kaka, U., Goh, Y. M., & Sazili, A. Q. (2023). *Electroencephalogram and Physiological Responses as Affected by Slaughter Empathy in Goats*. 13(6), Artículo 6. <https://doi.org/10.3390/ani13061100>
- Schork, I. G., Manzo, I. A., Oliveira, M. R. B. de, Costa, F. V., Young, R. J., & De Azevedo, C. S. (2023). *Testing the Accuracy of Wearable Technology to Assess Sleep Behaviour in Domestic Dogs: A Prospective Tool for Animal Welfare Assessment in Kennels* (9). 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ani13091467>
- Silva, A. C. de S., Arce, A. I. C., Arteaga, H., Sarnighausen, V. C. R., Atzingen, G. V. von, & Costa, E. J. X. (2023). *Improving Behavior Monitoring of Free-Moving Dairy Cows Using Noninvasive Wireless EEG Approach and Digital Signal Processing Techniques* (19). 13(19), Artículo 19. <https://doi.org/10.3390/app131910722>
- Sinitsyn, D. O., Poydasheva, A. G., Bakulin, I. S., Zabirova, A. H., Lagoda, D. Y., Suponeva, N. A., & Piradov, M. A. (2023). *Estimating the Frequencies of Maximal Theta-Gamma Coupling in EEG during the N-Back Task: Sensitivity to Methodology and Temporal Instability* (12). 16(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/a16120540>
- Murillo, C., Weng, H.-Y., Weil, A. B., Kreuzer, M., & Ko, J. C. (2022). *Perioperative Brain Function Monitoring with Electroencephalography in Horses Anesthetized with Multimodal Balanced Anesthetic Protocol Subjected to Surgeries* (20). 12(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/ani12202851>
- Söbbeler, F. J., Wendt, S., Briese, A., Tünsmeier, J., Waldmann, K.-H., Kästner, S. B. R., & von Altrock, A. (2022). *Comparative Study of Pain-Related Responses of Male Piglets up to Seven Days of Age to the Application of Different Local Anaesthetics and Subsequent Castration* (20). 12(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/ani12202833>

- Hirashima, J., Saito, M., & Yokomori, M. (2022). The Potential of Bemegride as an Activation Agent in Electroencephalography in Dogs. *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, 12(22), 3210. <https://doi.org/10.3390/ani12223210>
- Cui, Y., Xie, S., Fu, Y., & Xie, X. (2023). Predicting Motor Imagery BCI Performance Based on EEG Microstate Analysis. *Brain Sciences*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/brainsci13091288>
- Luff, G. C., Belluomo, I., Lugarà, E., & Walker, M. C. (2024). The role of trained and untrained dogs in the detection and warning of seizures. *Epilepsy & Behavior*, 150, 109563. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2023.109563>
- Zhang, X. (2022). Effects of Anesthesia on Cerebral Blood Flow and Functional Connectivity of Nonhuman Primates. *Veterinary Sciences*, 9(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/vetsci9100516>
- Siniscalchi, M., d'Ingeo, S., & Quaranta, A. (2023). Effect of Attentional Bias on the 3D Rotated Objects Recognition Ability of Dogs. *Animals*, 13(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ani13101673>
- Petry, N. M., Wagner, J. A., Rash, C. J., & Hood, K. K. (2015). Perceptions about professionally and non-professionally trained hypoglycemia detection dogs. *Diabetes research and clinical practice*, 109(2), 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2015.05.023>
- Löscher, W., & Worrell, G. A. (2022). Novel subscalp and intracranial devices to wirelessly record and analyze continuous EEG in unsedated, behaving dogs in their natural environments: A new paradigm in canine epilepsy research. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1014269. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1014269>
- Moeller, J., Haider, H. A., & Hirsch, L. J. (2023, enero). *Electroencephalography (EEG) in the diagnosis of seizures and epilepsy—UpToDate*. <https://www.uptodate.com/contents/electroencephalography-eeeg-in-the-diagnosis-of->

seizures-and-

epilepsy?search=Electroencephalography%20(EEG)%20in%20the%20diagnosis%20of%20seizures%20and%20epilepsy.&source=search_result&selectedTitle=1~150&usage_type=default&display_rank=1

Pellegrino, F. (2015, enero). *Evaluacion De La Funcion Cerebral: Electroencefalografia Clinica En Pequeños Animales*. Engormix. https://www.engormix.com/mascotas/disfuncion-cerebral-mascotas/evaluacion-funcion-cerebral-electroencefalografia_a31295/

Bálint, A., Eleőd, H., Magyari, L., Kis, A., & Gácsi, M. (2022). Differences in dogs' event-related potentials in response to human and dog vocal stimuli; a non-invasive study. *Royal Society Open Science*, 9(4), 211769. <https://doi.org/10.1098/rsos.211769>

Davis, K. A., Sturges, B. K., Vite, C. H., Ruedebusch, V., Worrell, G., Gardner, A. B., Leyde, K., Sheffield, W. D., & Litt, B. (2011). A Novel Implanted Device to Wirelessly Record and Analyze Continuous Intracranial Canine EEG. *Epilepsy research*, 96(1–2), 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2011.05.011>

Ayora, M. J. M. (2021). *Procesamiento de señales EEG para el reconocimiento de emociones*.

Kujala, M. V., Kauppi, J.-P., Törnqvist, H., Helle, L., Vainio, O., Kujala, J., & Parkkonen, L. (2021). Time-resolved classification of dog brain signals reveals early processing of faces, species and emotion. *Scientific Reports*, 11(1), 6885. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85718-0>

Boros, M., Magyari, L., Török, D., Bozsik, A., Deme, A., & Andics, A. (2021). Neural processes underlying statistical learning for speech segmentation in dogs. *Current biology: CB*, 31(24), 5512–5521.e5. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.10.017>

Magyari, L., Huszár, Zs., Turzó, A., & Andics, A. (2020). Event-related potentials reveal limited readiness to access phonetic details during word processing in dogs. *Royal Society Open Science*, 7(12), 200851. <https://doi.org/10.1098/rsos.200851>

EEG - *Electroencephalography*—BCI | *NeuroSky*. (s/f). Recuperado el 7 de marzo de 2024, de <https://neurosky.com/biosensors/eeg-sensor/>

Vargas, L. (2024, enero 26). Uso de la videoelectroencefalografía como examen de primera línea en neurología veterinaria. Axon Comunicación. Expertos en soluciones integrales. <https://axoncomunicacion.net/uso-de-la-videoelectroencefalografia-como-examen-de-primera-linea-en-neurologia-veterinaria/>

MindSet Communications Protocol. (2010). *Neurosky Brain Computer Interface Techniques* http://wearcam.org/ece516/mindset_communications_protocol.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Tiempo de respuesta del sistema en el Sujeto 2

Tiempo (segundos)	Delta	Theta	Low Alpha	High Alpha	Low Beta	High Beta	Low Gamma	High Gamma
1	233701	9954	2375	2068	2030	2262	1163	503
2	1245403	352215	100414	91208	183982	185919	41480	39393
3	665913	118824	82412	46757	30012	37844	22488	33738
4	942542	1080371	366603	635519	337175	439618	52927	114638
5	96597	39627	12439	38115	22079	24474	8993	7985
6	1412287	1716257	87294	429942	553314	702607	136338	212235
7	601194	465312	151888	128807	189080	268957	75125	81088
8	237764	90366	65712	62545	24729	48741	17628	16733
9	1527484	189603	70266	129078	239415	65362	52291	45021
10	793039	207286	45254	192221	60407	84269	48035	42023
11	1325222	484849	15240	146449	97041	43572	43246	51368
12	2207097	714927	815816	651954	648190	660201	377774	189669
13	99390	88039	21641	5455	11614	11048	21420	11513
14	859578	518247	87531	85552	85174	81032	95549	78454
15	119039	129367	22669	27628	29694	44029	30707	22544
16	705952	340572	39142	68724	58975	75359	54125	54536
17	1080931	944890	525221	719060	743283	582201	173148	169360
18	630166	266786	162576	159898	62554	111728	46367	83680
19	418632	185341	59594	86592	35946	253236	167984	154536
20	486578	187539	67446	159080	78598	28946	24956	64054
21	1927169	2355593	213190	733384	647778	359387	234220	79412
22	2101569	144836	71059	287725	111992	120658	57925	109630

23	482657	89924	55073	33016	18218	13536	12207	14128
24	419204	435125	60627	48250	100670	113840	65765	43952
25	392117	204399	71708	92657	86111	82958	48242	43884
26	286562	55362	48969	28023	11285	27507	24718	8487
27	141801	50579	5907	17800	26501	56468	33162	12526
28	461646	1004176	503265	409786	107444	239560	159598	134844
29	1101993	283729	236780	346127	264761	352079	286561	211347
30	204993	57596	25220	6430	6419	3478	6280	6326
31	801624	360084	123220	131347	59736	141709	58901	38693
32	204511	53733	35269	14334	58571	24524	8504	17258
33	340621	79663	18001	10248	54585	49460	20497	18479
34	491069	129585	9152	20532	43808	41152	22359	22099
35	214817	81806	23224	39304	37804	35554	13214	4314
36	114741	112726	27890	24662	24244	30768	17436	14746
37	119798	117433	77925	145841	132667	126359	107157	105246
38	1498954	415849	340858	149511	148773	126038	42013	11456
39	1391369	362897	146597	132069	208856	155768	106123	96117
40	668932	45428	18399	31698	14665	20031	9750	6765
41	1371009	485591	53017	178082	322177	424764	98089	83836
42	47920	1550385	58233	97062	87201	140231	134938	31495

Anexo 2. Entrenamiento Sujeto 3 (perro entrenado)

