

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA

LICENCIATURA EN BIOINGENIERÍA MÉDICA

DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN PROFESIONAL



**“Diseño, Implementación y Evaluación de un Sistema
Experimental de Código Abierto para el
Condicionamiento del Miedo en Ratas”**

Tesis

Para obtener el título de
Licenciado en Bioingeniería Médica

Presenta

P. L. B. M. Daniel Enrique Fernández García

Director de Tesis

Dr. en C. Otniel Portillo Rodríguez

Codirector de Tesis

Dr. en T.D.E. Juan Manuel Jacinto Villegas

Revisores de Tesis

Dr. en I.A.M. Juan Carlos Ávila Vilchis

Dr. en I.I. Jorge Rodríguez Arce

Toluca, Estado de México, 2024

Índice general

1. Resumen	6
2. Acrónimos	7
3. Planteamiento del Problema	9
4. Justificación	11
5. Objetivos	13
5.1. Objetivo general	13
5.2. Objetivos específicos	13
6. Marco teórico	14
6.1. Fundamentos del Condicionamiento del Miedo: Análisis a través del Condicionamiento Clásico de Pavlov	14
6.2. Componentes Clave del Condicionamiento del Miedo: Entendiendo el Estímulo Condicionado, el Estímulo Incondicionado y la Respuesta Condicionada	15
6.3. Cámaras de Condicionamiento del Miedo: Herramientas para la Investigación del Comportamiento Animal	16
6.4. Medición del Comportamiento de Congelación en Experimentos de Condicionamiento del Miedo: Métodos y Técnicas	17
6.5. Sistemas Comerciales para el Condicionamiento del Miedo: Características y Especificaciones	19
6.5.1. Video Fear Conditioning, Med Associates	19
6.5.2. StartFear, Panlab	20
6.5.3. HABITEST, Coulbourn Instruments	21
6.5.4. Multi Conditioning, TSE Systems	21
6.6. Avances en la Investigación del Condicionamiento al Miedo: Explorando Soluciones de Hardware y Software de Código Abierto	22
6.6.1. Dispositivo personalizado y de bajo costo para el condicionamiento del comportamiento animal	23
6.6.2. OBAT (Operant Box for Auditory Tasks)	25
6.6.3. BehaviorDEPOT	26
6.6.4. Visiomode	27

6.6.5. pyControl	27
7. Materiales y Métodos	29
7.1. Análisis de Requerimientos	29
7.2. Descripción General del Sistema	30
7.3. Diseño del Dispositivo Electrónico	32
7.3.1. Selección de Componentes y Funcionamiento del Dispositivo . .	32
7.3.2. Diseño del Diagrama Electrónico y PCB	35
7.3.3. Construcción del Gabinete para el Dispositivo Electrónico	37
7.3.4. Desarrollo del Firmware para el Dispositivo	39
7.4. Generación de Estímulos y Medición del Movimiento	45
7.4.1. Estimulación Eléctrica para el Condicionamiento del Miedo y su Calibración	45
7.4.2. Estimulación Auditiva para el Condicionamiento del Miedo . . .	47
7.4.3. Estimulación Visual para el Condicionamiento del Miedo	49
7.4.4. Medición del Movimiento a través de Sensores PIR	49
7.5. Diseño y Construcción de la Cámara de Condicionamiento	50
7.6. Evaluación del Sistema	53
7.6.1. Análisis de Tareas	53
7.6.2. Cuestionario SUS	58
8. Resultados y Discusión	60
8.1. Resultados del Análisis de Tareas	60
8.2. Resultados del Cuestionario SUS	60
8.3. Discusión de los Resultados	62
9. Conclusiones	64
10. Referencias	67
11. Apéndices	78
11.1. Apéndice A	78
11.1.1. Plano Integrado de la PCB: Diseño y Esquema de Conexiones . .	78
11.1.2. Diagrama Electrónico: Diseño Jerárquico y Conexiones de Varias Hojas	79
11.1.3. Diagrama Electrónico: Etapa de Potencia y Alimentación	80
11.1.4. Diagrama Electrónico: Etapa Digital y de Microcontroladores . .	81
11.1.5. Diagrama Electrónico: Etapa de Shock y Calibración	82

11.2. Apéndice B	83
11.3. Apéndice C	84
11.3.1. Tapa Superior del Gabinete Electrónico: Plano CAD y Dimensiones	84
11.3.2. Tapa Inferior del Gabinete Electrónico: Plano CAD y Dimensiones	85
11.3.3. Gabinete del Módulo de Audio: Plano CAD y Dimensiones . . .	86

Índice de figuras

1.	Aparato utilizado en el estudio de Pavlov sobre el condicionamiento salival en perros. Obtenido de (1).	15
2.	Extinción del miedo dependiente del contexto en roedores. Modificado de (2).	16
3.	Condicionamiento auditivo del miedo en ratas. (A) Estímulo condicionado. (B) Estímulo incondicionado. (C) Respuesta condicionada. Modificado de (3).	17
4.	Respuesta de congelación condicionada típica en una rata. Obtenido de (4).	18
5.	Sistema NIR Video Fear Conditioning for General Use. Obtenido de (5).	20
6.	Sistema de Condicionamiento de Sobresalto y Miedo. Obtenido de (6).	21
7.	Sistema modular HABITEST. Obtenido de (7).	22
8.	Sistema Multi Conditioning. Obtenido de (8).	23
9.	Diagrama de funcionamiento del sistema. Obtenido de (9).	24
10.	Electrónica implementada en OBAT. (A) Tarjetas individuales. (B) Tarjetas apiladas, vista lateral. (C) Tarjetas apiladas, vista superior. Obtenido de (10).	25
11.	Estructura del software BehaviorDEPOT. Obtenido de (11).	26
12.	Visiomode: una plataforma flexible y escalable para crear tareas basadas en pantallas táctiles. Obtenido de (12).	28
13.	Componentes de hardware de pyControl. (A) Diagrama de una configuración típica de hardware. (B) Tarjeta electrónica. Obtenido de (13).	28
14.	Dibujo CAD del sistema, mostrando el dispositivo electrónico, los módulos intercambiables y la cámara de condicionamiento.	32
15.	La tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560, un componente esencial del sistema que proporciona una plataforma versátil y potente para la conexión y el control digital y analógico.	33
16.	La tarjeta de desarrollo NodeMCU, que añade capacidades de conexión Wi-Fi al sistema.	34
17.	La Adafruit MicroSD Card Breakout Board, que permite al sistema almacenar y recuperar datos de los experimentos.	34
18.	El módulo RTC, componente esencial en el sistema para garantizar un seguimiento preciso del tiempo durante los experimentos.	35
19.	Módulo de pantalla de 2.8 pulgadas TFT con ranura para tarjeta SD de ELEGOO, que proporciona una interfaz de usuario intuitiva para el sistema.	35

20.	Diagrama de conexión y funcionamiento del sistema de condicionamiento del miedo.	36
21.	Visualización superior del diseño de la PCB y el montaje de componentes del dispositivo electrónico.	37
22.	Vista lateral del gabinete construido para la electrónica con la señalización de los espaciadores utilizados.	38
23.	Vista superior del gabinete y el dispositivo electrónico, mostrando las áreas de interacción del usuario.	39
24.	Captura de pantalla de PlatformIO, la IDE utilizada para crear el proyecto y programar el firmware del sistema.	40
25.	Captura de pantalla que muestra la GUI del formulario web diseñado para la configuración personalizada de los parámetros del experimento.	42
26.	Diagrama de configuración inalámbrica del dispositivo electrónico para la ejecución de experimentos personalizados.	43
27.	Etapas del proceso del experimento de condicionamiento del miedo, desde la exploración del entorno, la aplicación de los estímulos y el fin del experimento.	44
28.	Diagrama electrónico del circuito de conversión V_{AC}/V_{DC}	45
29.	Diagrama electrónico para la generación del choque eléctrico.	46
30.	Diagrama electrónico para estimar la intensidad del choque eléctrico.	47
31.	Diagrama electrónico para la generación del estímulo auditivo.	48
32.	Representación visual del Módulo de Audio, incluye el amplificador PAM8406 y dos altavoces externos utilizados para la generación y amplificación del tono de estimulación.	48
33.	Diagrama electrónico para el encendido de la bombilla.	49
34.	Diagrama electrónico de la conexión de los sensores PIR para medir el movimiento de las ratas.	50
35.	Representación visual del Módulo de Sensor, incluye el sensor PIR HC-SR501.	50
36.	Sistema de condicionamiento.	51
37.	Representación gráfica de la vista frontal en 2D de la cámara de condicionamiento. Se destacan los elementos esenciales que contribuyen a la efectividad y versatilidad del diseño de la cámara de condicionamiento.	52
38.	Sesión introductoria del sistema experimental de condicionamiento del miedo para ratas.	54
39.	Participante interactuando con el sistema experimental en el LNAPC.	55

Resumen

En este trabajo presenta el diseño, implementación y evaluación de un sistema experimental de código abierto para el condicionamiento del miedo en ratas. En primer lugar, se recopilieron los requisitos de los investigadores del LNAPC, estableciendo una base sólida para el desarrollo del sistema.

A continuación, se llevó a cabo el diseño y construcción de la cámara de condicionamiento y el dispositivo electrónico. Este dispositivo electrónico permite la entrega de estímulos aversivos, como choques eléctricos ajustables en intensidad entre 0 y 1.5 mA, así como la generación de estímulos auditivos variables. Además, cuenta con la capacidad de modificar el contexto del experimento mediante la activación de una bombilla como estímulo visual.

Para complementar estas funcionalidades, se han integrado sensores PIR que registran el movimiento de las ratas durante el experimento. Esta adición se plantea como una propuesta para automatizar el registro de movimiento, con el objetivo de convertirse en una herramienta para estimar la respuesta de congelamiento en lugar de depender únicamente de la puntuación manual por parte de los observadores. Sin embargo, es importante destacar que la validación de estos sensores para tal propósito debe ser abordada en trabajos futuros.

Además, se desarrolló una GUI que permite la configuración inalámbrica de los experimentos de condicionamiento del miedo, brindando flexibilidad y facilidad de uso a los usuarios.

Una parte fundamental de este trabajo fue la evaluación de la usabilidad del sistema, que se llevó a cabo mediante un análisis de tareas y la aplicación del cuestionario SUS. Los resultados del análisis de tareas mostraron un éxito superior al 90% en todas las tareas evaluadas, lo que resalta la eficacia y la capacidad del sistema para cumplir con los objetivos establecidos. La aplicación del cuestionario SUS arrojó un promedio de puntuación global de 80.3, indicando una usabilidad excepcional del sistema.

Aunque estas pruebas se realizaron con usuarios en el LNAPC, aún no se ha aplicado el sistema a animales vivos. Sin embargo, el sistema cumple con todas las características descritas y está listo para ser utilizado en futuros experimentos con animales, proporcionando una base sólida para su aplicación en investigaciones futuras en el campo de la neurobiología animal.

Acrónimos

AC Alternating Current - Corriente Alterna.

ADC Analog to Digital Converter - Convertidor Analógico-Digital.

AP Access Point - Punto de Acceso.

API Application Programming Interface - Interfaz de Programación de Aplicaciones.

CAD Computer-Aided Design - Diseño Asistido por Computadora.

CR Conditioned Response - Respuesta Condicionada.

CS Conditioned Stimulus - Estímulo Condicionado.

DAC Digital to Analog Converter - Convertidor Digital-Analógico.

DC Direct Current - Corriente Directa.

EMG Electromyography - Electromiografía.

FPS Frames Per Second - Fotogramas por Segundo.

GPIO General Purpose Input/Output - Entrada/Salida de Propósito General.

GUI Graphical User Interface - Interfaz Gráfica de Usuario.

HTML HyperText Markup Language - Lenguaje de Marcas de Hipertexto.

HTTP Hypertext Transfer Protocol - Protocolo de Transferencia de Hipertexto.

I2C Inter-Integrated Circuit Bus - Circuito Inter-Integrado.

IDE Integrated Development Environment - Entorno de Desarrollo Integrado.

IoT Internet of Things - Internet de las Cosas.

IP Internet Protocol - Protocolo de Internet.

IR Infrared Radiation - Radiación Infrarroja.

ISR Interruption Service Routine - Servicio de Interrupción de Rutina.

LNAPC Laboratorio de Neurobiología de la Adicción y Plasticidad Cerebral.

MDF Medium Density Fiberboard - Tablero de Fibra de Densidad Media.

NIR Near-Infrared Imaging - Imágenes en el Infrarrojo Cercano.

PCB Printed Circuit Board - Placa de Circuito Impreso.

PIR Passive Infrared - Infrarrojos Pasivos.

PTSD Post-traumatic Stress Disorder - Trastorno de Estrés Postraumático.

PWM Pulse Width Modulation - Modulación por Ancho de Pulsos.

RAM Random Access Memory - Memoria de Acceso Aleatorio.

RISC Reduced Instruction Set Computer - Ordenador con Conjunto de Instrucciones Reducido.

RTC Real-Time Clock - Reloj en Tiempo Real.

SD Secure Digital - Digital Segura.

SMD Surface Mount Device - Dispositivo de Montaje en Superficie.

SPI Serial Peripheral Interface - Interfaz Periférica Serial.

SSID Service Set Identifier - Identificador de Conjunto de Servicios.

SUS System Usability Scale - Sistema de Escalas de Usabilidad.

TFT Thin Film Transistor - Transistor de Película Fina.

UAEMéx Universidad Autónoma del Estado de México.

UART Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - Receptor-Transmisor Asíncrono Universal.

US Unconditioned Stimulus - Estímulo Incondicionado.

USB Universal Serial Bus - Bus Universal Serial.

Planteamiento del Problema

El condicionamiento del miedo es un fenómeno psicológico utilizado para estudiar el aprendizaje y la memoria en la investigación neurobiológica. Esta metodología de investigación es fundamental en el estudio de los trastornos de ansiedad y el PTSD (14–18).

El PTSD y los trastornos de ansiedad son condiciones comunes que afectan a una proporción significativa de la población. Según un estudio, la prevalencia estimada de por vida del PTSD es del 7.8 % (19). Otro estudio encontró que la prevalencia de por vida del PTSD es cercana al 10 % (20). En cuanto a los trastornos de ansiedad, un estudio estimó que la prevalencia general de los trastornos de ansiedad era del 21.6 % (21).

En el PTSD, se ha observado que el miedo condicionado no se extingue adecuadamente, y los recordatorios de eventos traumáticos pueden causar respuestas patológicas de miedo condicionado incluso después de que el peligro ha pasado (22). Además, se ha demostrado que los individuos con PTSD muestran alteraciones en las respuestas autónomas al condicionamiento del miedo, como un sobresalto exagerado y una pobre inhibición del miedo (23). En cuanto a los trastornos de ansiedad, se ha encontrado que la sensibilidad a la ansiedad, o el miedo a las sensaciones relacionadas con la excitación, puede fortalecer la relación entre los síntomas del PTSD y las respuestas de conductancia de la piel durante el condicionamiento del miedo y la extinción (24).

Mediante el uso de modelos animales y paradigmas experimentales, los investigadores pueden estudiar los mecanismos neuronales y conductuales subyacentes del aprendizaje y la memoria del miedo, así como explorar los efectos de diversas intervenciones sobre las conductas relacionadas con el miedo (25–27).

Los estudios de condicionamiento del miedo a menudo utilizan una variedad de equipos y técnicas. Por ejemplo, los estudios en roedores pueden implicar el uso de cajas de condicionamiento del miedo que permiten la administración controlada de estímulos aversivos, como choques eléctricos, junto con estímulos neutros, como tonos o luces (17). A continuación, se miden las respuestas de miedo de los animales mediante diversas técnicas conductuales, fisiológicas y neurobiológicas (28–30).

Una de las principales técnicas para medir la respuesta de miedo en roedores es el comportamiento de congelamiento, que se caracteriza por la ausencia de movimiento excepto la respiración (31). Tradicionalmente, la medición del comportamiento de congelamiento ha sido realizada manualmente por observadores entrenados mediante

grabaciones de vídeo. Este método requiere mucho tiempo y puede ser subjetivo, lo que conlleva una variabilidad entre observadores y una fiabilidad reducida.

Estas investigaciones con modelos animales de condicionamiento del miedo han aportado valiosos conocimientos sobre las bases neurobiológicas de estos trastornos y han permitido el desarrollo de nuevas estrategias de tratamiento (22, 32–34). Sin embargo, los sistemas actuales de condicionamiento del miedo suelen carecer de flexibilidad y su capacidad para personalizar los parámetros experimentales es limitada (35). Los experimentos tradicionales de condicionamiento del miedo que utilizan cámaras de condicionamiento y dispositivos comerciales con tecnología protegida.

Estas limitaciones han motivado a los investigadores a desarrollar herramientas más precisas y adaptadas para comprender la respuesta de los animales al condicionamiento del miedo (9, 36–38). Además, la creación de nuevas herramientas han permitido a los investigadores desarrollar paradigmas que se ajusten directamente a la respuesta o conducta investigada (39–44).

Por lo tanto, el problema que se plantea es doble: por un lado, existe la necesidad de un sistema de condicionamiento del miedo que sea económicamente accesible, personalizable y de código abierto para adaptarse a las necesidades específicas de cada estudio. Por otro lado, se requiere de un método más eficiente y preciso para el registro y análisis de la respuesta de congelamiento en roedores.

En este trabajo propone abordar estos desafíos a través del diseño, implementación y evaluación de un sistema experimental de código abierto para el condicionamiento del miedo en ratas. Además, se buscan implementar sensores PIR para registrar señales de movimiento para la medición del comportamiento de congelamiento, que podrían mejorar la eficiencia y precisión de la evaluación de esta respuesta, lo que podría impulsar la investigación en el campo de la neurobiología del aprendizaje y la memoria, así como en la comprensión y tratamiento de los trastornos de ansiedad y el PTSD.

Justificación

La justificación de este proyecto radica en la necesidad de superar las limitaciones actuales en la investigación del condicionamiento del miedo. A pesar de la importancia de este campo de estudio para entender trastornos como la ansiedad y el trastorno de estrés postraumático, los investigadores se enfrentan a desafíos significativos debido a las limitaciones de los sistemas experimentales disponibles.

En primer lugar, los sistemas comerciales para el estudio del condicionamiento del miedo son a menudo costosos, lo que limita su accesibilidad para muchos laboratorios. Una forma de crear nuevas herramientas para el condicionamiento del miedo es ponerlas a disposición de los investigadores como recursos de código abierto (45). Las herramientas de código abierto significa que todo el código fuente y los diseños se ponen a disposición de quien quiera utilizarlos. Este enfoque puede conducir a una mayor colaboración e innovación en la comunidad científica, ya que los investigadores pueden utilizar y modificar las herramientas existentes para sus propios experimentos (46, 47). Al proponer un sistema de código abierto, este proyecto busca ofrecer una solución más asequible y accesible a los investigadores.

En segundo lugar, los sistemas comerciales existentes pueden no adaptarse a las necesidades específicas de cada estudio. El desarrollo de un sistema de código abierto que pueda personalizarse para realizar experimentos de condicionamiento del miedo podría conducir a investigaciones más precisas en la investigación de los circuitos neuronales implicados en la adquisición, expresión y extinción del miedo. La ventaja de contar con un dispositivo de código abierto es que permite a los investigadores personalizar el dispositivo según sus necesidades experimentales específicas, a la vez que les permite modificar el software y el hardware según sea necesario.

Además, el análisis de la respuesta de congelación, una medida clave en los estudios de condicionamiento del miedo, se basa actualmente en la puntuación humana, lo que puede ser un proceso lento, sujeto a errores y variabilidad. Este proyecto propone la implementación de un método innovador para registrar la respuesta de congelación en ratas. El dispositivo propuesto utiliza sensores PIR para detectar el movimiento de las ratas, lo que permitirá recopilar datos sobre su actividad en respuesta a los estímulos (48).

Por tanto, este proyecto tiene el potencial de impulsar la investigación en el condicionamiento del miedo al hacerla más accesible y adaptable. Los avances en esta área podrían llevar a una mejor comprensión de la neurobiología del aprendizaje y la

memoria, así como de los trastornos de ansiedad y el PTSD. Esto podría, a su vez, conducir a la creación de tratamientos más efectivos para estos trastornos, beneficiando a miles de personas en todo el mundo.

Objetivos

5.1. Objetivo general

Diseñar, implementar y evaluar la usabilidad de un sistema experimental de código abierto para condicionamiento del miedo en ratas, integrando estímulos eléctricos, sonoros y visuales, así como sensores PIR para detectar el movimiento de las ratas.

5.2. Objetivos específicos

1. Recopilar las necesidades de los investigadores del LNAPC para definir requisitos específicos del sistema experimental.
2. Diseñar e implementar un sistema experimental que permita la entrega controlada de estímulos eléctricos, sonoros y visuales, así como la recopilación de señales de movimiento de sensores PIR.
3. Desarrollar una interfaz de usuario intuitiva y fácil de usar para que los investigadores puedan configurar los experimentos de manera efectiva.
4. Conducir pruebas de usabilidad centradas en la ejecución de tareas específicas dentro del sistema, evaluando la eficacia de los usuarios al completar estas tareas, así como su satisfacción general, mediante la aplicación del cuestionario SUS.
5. Identificar áreas de mejora en el sistema a partir de los datos recopilados durante las pruebas de usabilidad.

Marco teórico

6.1. Fundamentos del Condicionamiento del Miedo: Análisis a través del Condicionamiento Clásico de Pavlov

Las emociones son un elemento fundamental del comportamiento humano y desempeñan un papel importante en la forma en que las personas perciben su entorno y responden a él. El comportamiento, por otra parte, se refiere a las acciones, reacciones y hábitos de los individuos, y a menudo está influenciado por las emociones (49). El estudio de las emociones y el comportamiento es importante en diversos campos, como la psicología, la neurociencia y la biología, ya que permite comprender la forma en que las personas aprenden, se adaptan y se enfrentan a su entorno (50).

Un área de investigación especialmente interesada en estudiar la relación entre emociones y comportamiento es el condicionamiento del miedo, que explora cómo los individuos desarrollan y responden a estímulos de miedo (51). Comprender la interacción entre las emociones, el comportamiento y el condicionamiento del miedo es esencial para entender mejor el comportamiento humano y desarrollar tratamientos eficaces para los trastornos de ansiedad y otras afecciones relacionadas (52).

Los trastornos de salud mental suelen estar asociados a cambios en el cerebro y otros mecanismos neurológicos. Estos cambios pueden afectar la forma en que los individuos procesan y responden a las emociones, en particular al miedo y la ansiedad. Las investigaciones han demostrado que la amígdala desempeña un papel crucial en el condicionamiento del miedo y suele mostrarse hiperactiva en las personas con trastornos de ansiedad. Otras regiones del cerebro, como la corteza prefrontal y el hipocampo, también intervienen en la regulación de las emociones y en los trastornos de ansiedad (53).

Mediante el uso de técnicas de condicionamiento Pavloviano, los investigadores han podido obtener información valiosa sobre la fisiopatología de estos trastornos e identificar posibles estrategias de intervención (25, 54–56). Los experimentos originales de Pavlov, realizados a finales del siglo XIX y principios del XX, se centraron en perros y en el estudio de la salivación en respuesta a la comida. En sus experimentos, Pavlov observó que los perros empezaban a salivar en respuesta a estímulos que previamente se habían asociado a la comida, como el sonido de una campana o la visualización de una bata de laboratorio (ver Figura 1).

Este fenómeno, que Pavlov denominó reflejo condicionado, estableció las bases del

concepto de condicionamiento clásico, en el que un estímulo neutro (como el sonido de una campana) se asocia a un estímulo incondicionado (como la comida) para producir una respuesta condicionada (como la salivación). El trabajo de Pavlov revolucionó la comprensión de cómo se produce el aprendizaje y condujo al desarrollo del condicionamiento clásico como herramienta fundamental en el estudio del comportamiento (57).

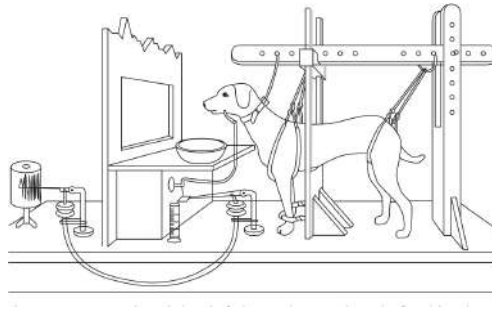


Figura 1: Aparato utilizado en el estudio de Pavlov sobre el condicionamiento salival en perros. Obtenido de (1).

6.2. Componentes Clave del Condicionamiento del Miedo: Entendiendo el Estímulo Condicionado, el Estímulo Incondicionado y la Respuesta Condicionada

En el contexto del condicionamiento del miedo, el trabajo de Pavlov sobre el condicionamiento clásico estableció las bases para que los investigadores estudien los mecanismos neuronales y conductuales implicados en la formación de asociaciones de miedo (58). Los componentes clave del condicionamiento del miedo incluyen el CS, el US, la CR, el contexto, la extinción y el restablecimiento (ver Figura 2).

El CS es un estímulo neutro que se empareja con el US para crear una asociación entre ambos. Puede ser cualquier tipo de estímulo, como un tono, una luz o una imagen. El US, por su parte, es un estímulo aversivo que provoca de forma natural una respuesta de miedo, como una descarga eléctrica o un ruido fuerte. Cuando el CS se presenta repetidamente junto con el US, el animal aprende a asociar los dos estímulos, de modo que el CS por sí solo acaba provocando una CR.

La CR es la respuesta conductual o fisiológica provocada por el CS tras su asociación con el US. Para estudiar los efectos de diferentes contextos en el condicionamiento del miedo, los investigadores pueden presentar el CS y el US en diferentes entornos o ambientes. Por ejemplo, el CS y el US pueden presentarse en un entorno nuevo, en un entorno familiar o en diferentes tipos de contextos.

La extinción es la reducción o eliminación de la respuesta de miedo cuando se presenta repetidamente el CS sin el US. La extinción es un aspecto importante de la investigación del condicionamiento del miedo, ya que puede utilizarse para estudiar los mecanismos subyacentes a la memoria del miedo y los efectos de diferentes intervenciones sobre las conductas relacionadas con el miedo.

El restablecimiento es la reaparición de la respuesta de miedo tras la reintroducción del US después de la extinción, y es un fenómeno importante de estudiar, ya que puede proporcionar información sobre los mecanismos que subyacen a la persistencia de los recuerdos de miedo y la reaparición de conductas relacionadas con el miedo.

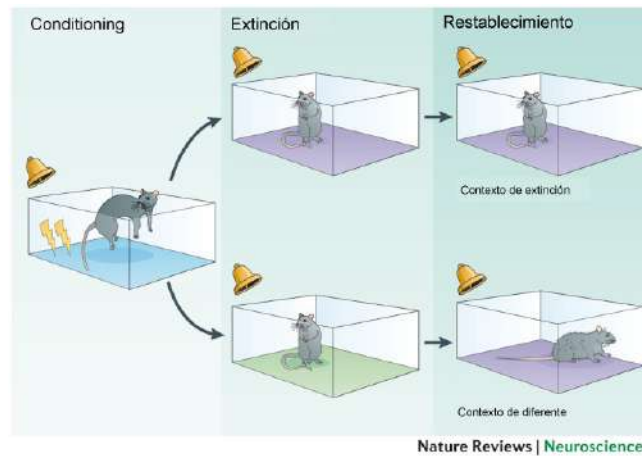


Figura 2: Extinción del miedo dependiente del contexto en roedores.
Modificado de (2).

6.3. Cámaras de Condicionamiento del Miedo: Herramientas para la Investigación del Comportamiento Animal

Los experimentos de condicionamiento del miedo suelen realizarse utilizando cámaras de condicionamiento especializadas, también conocidas como aparatos de condicionamiento del miedo. Estas cámaras están diseñadas para crear un entorno controlado en el que los investigadores pueden presentar y manipular los estímulos, para así registrar las respuestas conductuales.

Normalmente, una cámara de condicionamiento consiste en una pequeña caja equipada con una serie de elementos, como generadores de sonido, fuentes de luz y rejillas de choque eléctrico. La cámara también está equipada con sensores y equipos de grabación que permiten a los investigadores medir el comportamiento del animal y sus respuestas fisiológicas.

En un experimento típico de condicionamiento del miedo, intervienen varias etapas para evaluar la respuesta de miedo en los animales (31, 59). En primer lugar, en la etapa de habituación, se permite al animal explorar la cámara de condicionamiento sin ningún estímulo ni choque para habituarlo al entorno. En la etapa de condicionamiento, se presenta al animal un CS, como un tono o una luz, seguido de un US, como un choque eléctrico en las patas. Este emparejamiento se repite varias veces para crear una asociación entre el CS con el US y así conseguir el aprendizaje del miedo (ver Figura 3).

A continuación, en la fase de prueba de miedo contextual, se devuelve al animal a la cámara de condicionamiento sin ningún estímulo y se mide su comportamiento de congelación. La prueba de miedo contextual mide la respuesta de miedo del animal al contexto en el que recibió el condicionamiento. En la etapa de prueba de miedo al estímulo, se expone al animal al CS en un ambiente nuevo y se mide su comportamiento de congelamiento. La prueba de miedo al estímulo mide la respuesta de miedo del animal sólo al CS. A continuación, en la fase de extinción, se expone al animal al CS varias veces sin ningún US para extinguir la respuesta de miedo. Por último, en la fase de restablecimiento, se vuelve a exponer al animal al CS o al contexto condicionante para comprobar si recuerda el miedo.

Los investigadores pueden manipular diversos aspectos del proceso de condicionamiento del miedo, como el momento de aplicación y la intensidad del estímulo aversivo, para estudiar cómo influyen estos factores en el aprendizaje y la memoria del miedo. También pueden medir diversas respuestas conductuales y fisiológicas al estímulo de miedo para comprender mejor la respuesta del animal.

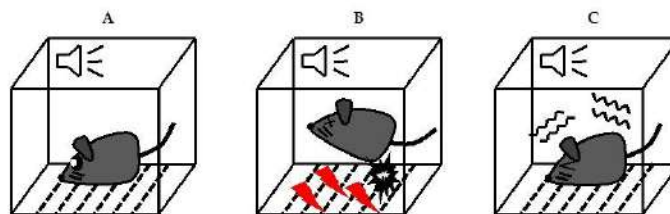


Figura 3: Condicionamiento auditivo del miedo en ratas. (A) Estímulo condicionado. (B) Estímulo incondicionado. (C) Respuesta condicionada. Modificado de (3).

6.4. Medición del Comportamiento de Congelación en Experimentos de Condicionamiento del Miedo: Métodos y Técnicas

Una de las métricas más comúnmente utilizadas en los experimentos de condicionamiento del miedo es el comportamiento de congelación. El comportamiento

de congelación es una respuesta adaptativa que ha evolucionado para proteger a los animales de posibles amenazas en su entorno (ver Figura 4). Cuando un animal percibe una amenaza, su cuerpo responde automáticamente activando el circuito del miedo en el cerebro, lo que desencadena una serie de cambios fisiológicos y de comportamiento, incluido el congelamiento (60). El comportamiento de congelación se caracteriza por el cese total del movimiento, excepto la respiración, y suele ir acompañado de una postura encogida (61). Existen varias formas de medir el comportamiento de congelación, como la puntuación manual a través de la observación visual, el seguimiento por vídeo, la EMG y el uso de sensores PIR.



Figura 4: Respuesta de congelación condicionada típica en una rata.
Obtenido de (4).

La puntuación manual a través de la observación visual consiste en observar al animal y notar cuando entra en un estado de congelamiento. Los observadores capacitados utilizan un sistema de puntuación estandarizado para medir la duración y la frecuencia del comportamiento de congelación (62, 63). El observador puede usar un cronómetro para medir la duración de los episodios de congelación. Para garantizar la confiabilidad y la consistencia, el observador está capacitado para reconocer y calificar el comportamiento de congelación utilizando criterios específicos. Estos criterios pueden incluir la ausencia de movimiento, la reducción de la frecuencia respiratoria y la postura del animal. Sin embargo, la observación visual es subjetiva y puede estar sujeta al sesgo del observador. Para minimizar el sesgo del observador, se pueden usar múltiples observadores y sus puntajes se pueden comparar para evaluar la confiabilidad entre observadores.

La congelación también se puede medir utilizando un software de seguimiento de vídeo en experimentos de condicionamiento del miedo. El animal se coloca en una cámara de condicionamiento equipada con cámaras, y el software rastrea los movimientos del animal y calcula la cantidad de tiempo que pasó congelado (35, 41, 44). El software de seguimiento de vídeo proporciona un método más objetivo y automatizado para medir el comportamiento de congelación, ya que elimina la necesidad

de observación humana. El software puede medir el comportamiento de congelación durante períodos de tiempo más largos y en múltiples ensayos, lo que proporciona una evaluación más completa de la respuesta de miedo del animal. Sin embargo, el software de seguimiento de vídeo puede no ser tan sensible a los cambios en el comportamiento de congelación. El software puede pasar por alto episodios breves de congelamiento o clasificar otros comportamientos como congelamiento. Además, el software puede requerir calibración y validación para garantizar mediciones precisas.

El uso de EMG consiste en colocar electrodos en los músculos del animal y medir la actividad muscular durante el condicionamiento del miedo (64). El comportamiento de congelación se define normalmente como una disminución de la actividad muscular. La EMG puede proporcionar una medida directa del comportamiento de congelación, pero requiere procedimientos invasivos y puede no ser conveniente en todos los diseños experimentales. Además, las señales generadas por los músculos pueden verse afectadas por factores como la posición del animal, el movimiento o la fatiga muscular, lo que puede dificultar la medición precisa del comportamiento de congelación.

Para utilizar sensores PIR en la detección del comportamiento de congelación, los sensores se montan normalmente encima de la cámara de acondicionamiento y a medida que el animal se mueve alrededor de la cámara, su temperatura corporal cambia y la cantidad de IR reflejada de vuelta al sensor también (43, 48). Cuando el animal se congela, su temperatura corporal permanece relativamente constante, por lo que la cantidad de radiación reflejada detectada por el sensor PIR disminuye significativamente. Esta disminución puede ser detectada por un dispositivo conectado al sensor PIR lo que permite a los investigadores medir con precisión el comportamiento de congelación.

6.5. Sistemas Comerciales para el Condicionamiento del Miedo: Características y Especificaciones

Existen varios sistemas comerciales de condicionamiento del miedo que los investigadores pueden utilizar en sus experimentos. Cada sistema tiene sus propias características y especificaciones que pueden ser más adecuadas para determinados tipos de experimentos o especies de animales.

6.5.1. Video Fear Conditioning, Med Associates

Un sistema popular es el NIR Video Fear Conditioning para uso general (Med Associates Inc.), este sistema ofrece flexibilidad en términos de opciones de estimulación y modificación contextual para llevar a cabo experimentos. Los sistemas están diseñados

para adaptarse a experimentos con o sin iluminación brillante, utilizando en su lugar NIR para mantener la calidad del vídeo al tiempo que se minimizan las posibles influencias en el comportamiento animal. Cada paquete incluye una cámara de vídeo digital de alta calidad con un objetivo NIR montado en la puerta del dispositivo (ver Figura 5).

Los sistemas cuentan con luz NIR que elimina la necesidad de luz visible brillante, aunque la luz visible aún se puede utilizar como un estímulo durante los experimentos sin afectar la grabación de vídeo. Los paquetes ofrecen cinco configuraciones de intensidad de luz blanca definidas por el usuario y permiten la grabación de vídeo en tiempo real a 30 FPS lo que facilita la identificación de movimientos sutiles como el movimiento de los bigotes, el movimiento de la cola y el comportamiento de congelación. Además, se ofrecen complementos contextuales para introducir variables adicionales y estudiar el impacto de los estímulos contextuales en el aprendizaje y la memoria (5).



Figura 5: Sistema NIR Video Fear Conditioning for General Use. Obtenido de (5).

6.5.2. StartFear, Panlab

StartFear (Panlab, S.L.U) es un sistema que permite realizar experimentos de condicionamiento del miedo y reflejo de sobresalto en un mismo dispositivo, sin importar si se trata de ratas o ratones. Utiliza un sistema de transductores de peso de alta sensibilidad para registrar y analizar el movimiento del animal (ver Figura 6).

La señal analógica se envía a los módulos de software FREEZING y STARTLE para su grabación y análisis posterior en términos de actividad y caracterización de la respuesta de sobresalto. El sistema también incluye una interfaz adicional que permite controlar los estímulos (luz, sonidos, descarga eléctrica, ráfaga de aire) desde el software PACKWIN. La jaula está construida con paredes de metacrilato negro y una puerta frontal transparente, y se puede utilizar diferentes materiales o colores en las paredes, cubierta y suelo según el experimento. Además, se puede agregar un cilindro

transparente en la cámara experimental para alterar la percepción espacial durante la prueba (6).



Figura 6: Sistema de Condicionamiento de Sobresalto y Miedo.
Obtenido de (6).

6.5.3. HABITEST, Coulbourn Instruments

HABITEST (Coulbourn Instruments LLC) es un sistema modular diseñado para facilitar una amplia gama de pruebas de comportamiento dentro de un mismo dispositivo. Incluye jaulas de prueba modulares, dispositivos de estímulo y respuesta, y varios accesorios. Este sistema permite a los investigadores llevar a cabo experimentos que abarcan diversos paradigmas del comportamiento, como laberintos, condicionamiento operante, actividad espacial, y condicionamiento del miedo (ver Figura 7).

Cuando se combina con el software FreezeFrame, HABITEST proporciona los componentes necesarios para experimentos de condicionamiento por miedo en animales de laboratorio pequeños, ofreciendo palancas, sensores de toque nasal, estímulos, bombas de medicamentos y generadores de descargas. Además, HABITEST incorpora detección de congelación basada en vídeo, utilizando un algoritmo de detección de movimiento propietario para identificar con precisión los movimientos de los animales de tan solo 1 mm. Logra un alto nivel de concordancia con observadores humanos capacitados en la detección de comportamiento de congelación. El sistema también permite el almacenamiento de imágenes de vídeo para su análisis y revisión futura (7).

6.5.4. Multi Conditioning, TSE Systems

El sistema Multi Conditioning (TSE Systems GmbH) es una plataforma versátil y modular que integra diez paradigmas conductuales diferentes, permitiendo la evaluación



Figura 7: Sistema modular HABITEST. Obtenido de (7).

exhaustiva del aprendizaje, la memoria, la emoción, el estrés y el comportamiento locomotor en ratas y ratones. Este sistema destaca en el mercado por su excepcional variabilidad y flexibilidad, proporcionando a los investigadores una herramienta única para sus necesidades experimentales. La unidad de control del sistema crea un entorno controlado y cerrado, lo que permite configurar de forma total de las condiciones ambientales mediante software. Esta característica elimina la influencia de factores externos como el sonido, el olor, la luz, la temperatura e incluso la presencia del observador, maximizando así la precisión y reproducibilidad de los datos experimentales tanto dentro de un mismo laboratorio como entre laboratorios (ver Figura 8).

La unidad de control se complementa con una amplia gama de contextos y accesorios, que ofrecen opciones como jaulas de uno o dos compartimentos con o sin suelo, así como otras especializadas para la integración con optogenética. El sistema permite la administración precisa de descargas de pie con una amplitud de paso de 0.025 mA. También, se pueden utilizar estímulos de luz, ruido y sonido sinusoidal controlados por software con intensidad y frecuencia ajustables, incluso durante el experimento. La posición y el movimiento del animal se registran con precisión mediante un sensor IR 3D de alta resolución. Además, la grabación simultánea de vídeo permite realizar otras observaciones, incluso en total oscuridad (8).

6.6. Avances en la Investigación del Condicionamiento al Miedo: Explorando Soluciones de Hardware y Software de Código Abierto

Aunque los sistemas comerciales de condicionamiento del miedo ofrecen muchas características y funciones útiles, pueden ser bastante caros, lo que puede suponer un obstáculo para algunos investigadores. Además, estos sistemas no siempre son



Figura 8: Sistema Multi Conditioning. Obtenido de (8).

fácilmente personalizables o adaptables a las necesidades específicas de la investigación, lo que limita su utilidad en determinados diseños experimentales. Aquí es donde las soluciones de código abierto de bajo coste pueden ser beneficiosas.

Las soluciones de código abierto pueden ser desarrolladas y personalizadas por los propios investigadores, lo que permite un mayor grado de flexibilidad en el diseño experimental. Además, estas soluciones pueden ser significativamente menos costosas que los sistemas comerciales, lo que puede hacer que los experimentos de acondicionamiento del miedo sean más accesibles para los investigadores con recursos limitados. En los últimos años, ha existido una tendencia creciente hacia el desarrollo de sistemas de condicionamiento de código abierto, incluyendo soluciones tanto de software como de hardware. Estos sistemas permiten un mayor control y personalización de los parámetros experimentales.

6.6.1. Dispositivo personalizado y de bajo costo para el condicionamiento del comportamiento animal

Amaral y cols. (9) desarrollaron un dispositivo personalizado y de bajo costo para el condicionamiento del comportamiento animal. El dispositivo funciona de forma inalámbrica a través de microcontroladores, utiliza un Arduino Due y un módulo ESP8266-12E. El módulo ESP8266-12E sirve como GUI, y el Arduino Due es quien controla la generación de estímulos y realización de tareas en los experimentos.

El dispositivo incluye sistemas de estimulación auditiva y eléctrica, que pueden utilizarse como CS y US en experimentos de condicionamiento. El sistema auditivo consta de un DAC, un amplificador de audio y un altavoz. El sistema de estimulación eléctrica utiliza un circuito de alto voltaje de DC y una resistencia limitadora de corriente para suministrar el choque eléctrico a través de las barras de la cámara. La GUI fue

desarrollada como una interfaz web, permitiendo programar a través de una conexión Wi-Fi los parámetros del experimento, como el tiempo de activación del sonido y del choque, la intensidad del sonido y su frecuencia de modulación (ver Figura 9).

La cámara de condicionamiento fue construida con placas de acrílico transparente y barras de acero inoxidable. El sistema de estimulación eléctrica está diseñado para administrar el choque eléctrico a través de las barras mediante un transformador, un puente rectificador, una resistencia limitadora de corriente y una resistencia variable.

La validación del dispositivo se realizó en dos etapas. En primer lugar, se realizaron pruebas de laboratorio para verificar la funcionalidad correcta de los circuitos, las especificaciones de seguridad y el firmware para la presentación del CS y el US antes de utilizar el sistema en organismos vivos. En la segunda etapa, se sometió a animales experimentales a una tarea de condicionamiento de miedo utilizando estimulación auditiva.

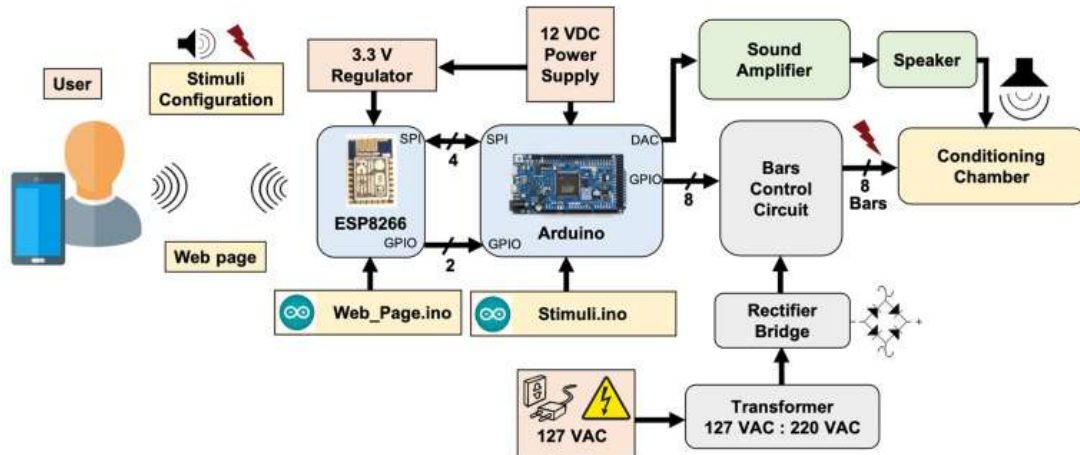


Figura 9: Diagrama de funcionamiento del sistema. Obtenido de (9).

Para determinar la flexibilidad y precisión del estímulo eléctrico, se conectó una resistencia de 20 k Ω entre dos barras de la cámara para simular la resistencia de un roedor. Se midió el voltaje en esta resistencia con un osciloscopio para cuatro valores de intensidad programados durante un período de tiempo de 1 segundo, de modo que la corriente eléctrica pudiera determinarse fácilmente utilizando la Ley de Ohm.

Además, otra prueba de laboratorio evaluó cuánto cambia la intensidad de la descarga eléctrica en relación con la variabilidad en la resistencia de la piel del animal. Para esto, se programó una descarga eléctrica de 400 μ A y se midió su intensidad en tres casos diferentes: 15 k Ω , 20 k Ω y 25 k Ω . Estas pruebas de banco se realizaron para garantizar la fiabilidad, precisión y seguridad del aparato personalizado para futuros experimentos con animales vivos.

6.6.2. OBAT (Operant Box for Auditory Tasks)

OBAT (10) es una cámara de condicionamiento de código abierto y fue diseñada para estudiar la percepción auditiva en pequeños primates. Incluye funciones tales como barras de respuesta sensibles al tacto y un sistema de recompensa. Se trata del primer dispositivo de código abierto diseñado para estos animales que puede realizar tareas auditivas de dos opciones.

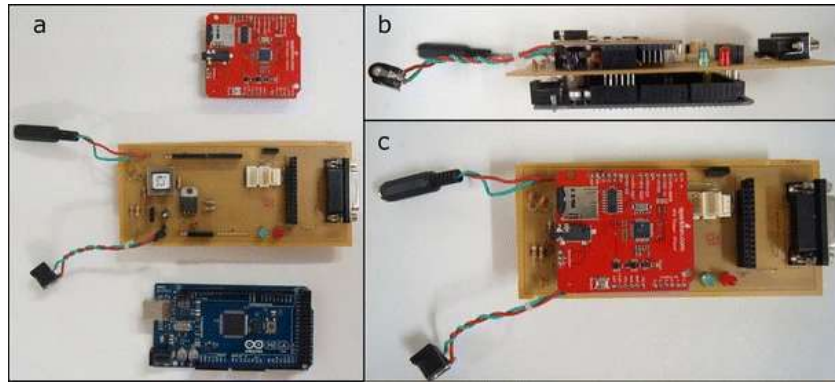


Figura 10: Electrónica implementada en OBAT. (A) Tarjetas individuales. (B) Tarjetas apiladas, vista lateral. (C) Tarjetas apiladas, vista superior. Obtenido de (10).

La cámara de condicionamiento consta de tres módulos: el de generación de sonido, las barras de respuesta y el de generación de recompensa, todos ellos conectados a una tarjeta Arduino Mega2560. Se ha diseñado una tarjeta electrónica personalizada para facilitar las conexiones entre el Arduino, una tarjeta comercial reproductor MP3, las barras de respuesta y el sistema de entrega de recompensas (ver Figura 10). El reproductor MP3 utiliza archivos de audio almacenados en una tarjeta SD, que son amplificados y reproducidos a través de un altavoz. Las barras de respuesta al tacto están controladas por servomotores, su extensión y retracción están controladas por el Arduino. Las barras son sensibles al tacto y cuando el animal las toca envía una señal al Arduino para accionar la entrega de una recompensa. El módulo de recompensa consiste en una estructura de madera que sostiene un motor AC conectado a un eje de tornillo, el motor controla la posición de un soporte móvil que entrega la recompensa al animal. Una GUI, desarrollada en Microsoft Visual Studio, establece una conexión con la placa Arduino y permite al investigador establecer los parámetros del experimento.

Los experimentos realizados para evaluar OBAT involucraron entrenar a un mono tití macho en una tarea discriminatoria utilizando dos estímulos auditivos. El mono fue alojado individualmente y recibió dos comidas diarias, con un retraso de 3 horas en la primera comida durante el experimento. Los estímulos auditivos utilizados fueron

vocalizaciones que representan llamadas de mono tití. El mono aprendió a tocar una barra específica después de cada estímulo para recibir una recompensa alimenticia. El entrenamiento consistió en cuatro fases: habituación, entrenamiento de tarea forzada y entrenamiento de tarea de elección con y sin repetición. El mono tití aprendió con éxito la tarea después de 20 sesiones de entrenamiento.

6.6.3. BehaviorDEPOT

BehaviorDEPOT (11) es una herramienta que facilita la conversión de datos de seguimiento de puntos clave de la anatomía del animal en información conductual significativa. Puede detectar eficazmente comportamientos en secuencias de vídeo y analizar los resultados de experimentos como el condicionamiento del miedo, la prueba de campo abierto, el uso de laberintos y la exploración de objetos nuevos.

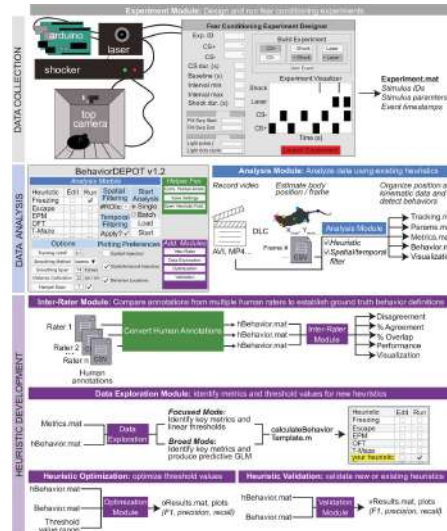


Figura 11: Estructura del software BehaviorDEPOT. Obtenido de (11).

Los investigadores pueden definir comportamientos de interés basándose tanto en la postura del animal como en su ubicación. La ventaja de utilizar el seguimiento de puntos clave es su capacidad para capturar con precisión la ubicación espacial y los movimientos a escala fina. BehaviorDEPOT emplea heurísticas, que son reglas simples basadas en definiciones humanas, para detectar comportamientos. La herramienta ofrece bajos índices de error y puede desarrollarse utilizando un pequeño número de fotogramas de vídeo anotados manualmente. Además, la herramienta permite a los usuarios desarrollar e integrar sus propias heurísticas en la interfaz gráfica, lo que la hace accesible tanto para programadores experimentados como inexpertos.

BehaviorDEPOT consta de seis módulos independientes (ver Figura 11). El módulo

de Experiment es una aplicación de MATLAB con una interfaz gráfica que permite a los usuarios diseñar y llevar a cabo experimentos de condicionamiento del miedo. Este software utiliza Arduinos para interactuar con hardware disponible comercialmente, como estimuladores y láseres, y controlar los estímulos utilizados en los experimentos. Por otro lado, el módulo de Analysis importa los datos de seguimiento de puntos clave, calcula métricas de postura y cinemáticas, detecta comportamientos y analiza los resultados de los experimentos. Además, existen cuatro módulos adicionales que ayudan a los usuarios a desarrollar heurísticas personalizadas. El módulo de Inter-Rater compara las anotaciones realizadas por humanos para definir comportamientos de interés, las cuales son utilizadas como referencia para las heurísticas de detección de comportamiento. El módulo de Data Exploration identifica las características del movimiento que tienen mayor valor predictivo para comportamientos específicos. Asimismo, el módulo de Optimization encuentra combinaciones de umbrales de características que maximizan la detección de comportamientos, mientras que el módulo de Validation reporta la precisión de las heurísticas utilizadas.

6.6.4. Visiomode

Visiomode (12) es una plataforma de software y hardware de código abierto para crear experimentos conductuales basados en pantallas táctiles para roedores. Esta plataforma combina una interfaz de usuario basada en la web y un hardware asequible para la realización diversas tareas visuomotoras. Permite a los usuarios definir sus propios estímulos visuales y admite la personalización de tareas (ver Figura 12).

La plataforma incluye una API para la adquisición de datos, escalabilidad y personalización. La interfaz web de Visiomode permite a los usuarios configurar y ejecutar experimentos, ajustar parámetros y supervisar el análisis de tareas en tiempo real. La plataforma admite la integración de dispositivos USB externos y proporciona sincronización con los registros fisiológicos. También permite exportar los datos de las sesiones en distintos formatos. El diseño incluye una cámara de comportamiento con una pantalla táctil y una cámara web para grabar el comportamiento del ratón.

6.6.5. pyControl

pyControl (13) es un sistema de hardware y software de código abierto para el control de experimentos de comportamiento. El sistema consta de tres componentes: el framework pyControl, el hardware y la GUI.

El framework proporciona una sintaxis para programar tareas de comportamiento

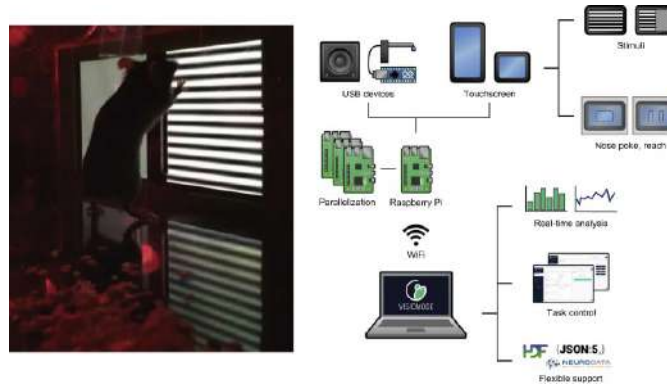


Figura 12: Visiomode: una plataforma flexible y escalable para crear tareas basadas en pantallas táctiles. Obtenido de (12).

utilizando Python. Las tareas de los experimentos son definidos por el usuario a través de archivos de Python y se ejecutan directamente en el hardware del microcontrolador a través del framework desarrollado. El hardware de pyControl incluye una placa de expansión que se conecta a un microcontrolador y varios dispositivos, como sensores y actuadores para crear experimentos de comportamiento personalizados (ver Figura 13). La GUI facilita la configuración de experimentos, la visualización de datos y la configuración del sistema.

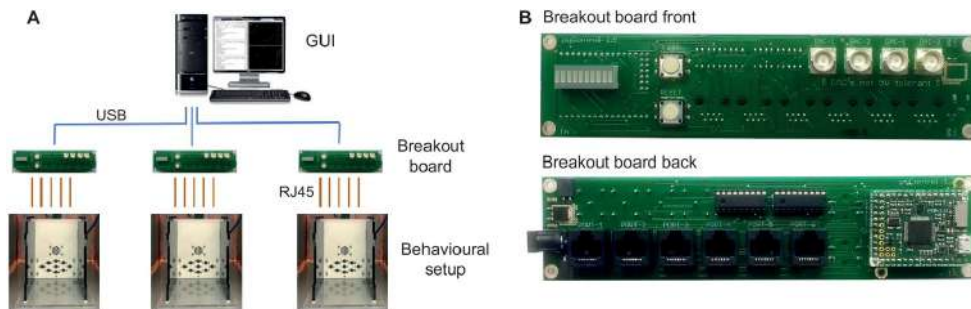


Figura 13: Componentes de hardware de pyControl. (A) Diagrama de una configuración típica de hardware. (B) Tarjeta electrónica. Obtenido de (13).

Materiales y Métodos

7.1. Análisis de Requerimientos

El desarrollo del sistema de condicionamiento del miedo para ratas se llevó a cabo siguiendo un enfoque que prioriza las necesidades y requerimientos de los usuarios finales. Este método implica considerar de manera primordial los requisitos proporcionados a lo largo de todo el proceso de diseño y desarrollo del sistema, lo que facilita la creación de una solución adaptada a sus necesidades y que simplifica su utilización (65).

Para este proyecto, los usuarios finales son los investigadores del LNAPC de la UAEMéx. Ellos proporcionaron los requerimientos iniciales basados en sus necesidades específicas y su experiencia en el campo de la neurobiología animal. Durante el curso del proyecto, se tuvieron varias interacciones con los investigadores. El propósito de estas interacciones fue entender mejor sus necesidades y requerimientos para el sistema de condicionamiento.

A lo largo de este proceso, se prestó especial atención a los desafíos y limitaciones que los investigadores a menudo enfrentan durante las pruebas de condicionamiento. Estos desafíos abarcan desde la necesidad de una interfaz de usuario fácil de usar, hasta la necesidad de un sistema que pueda generar estímulos de manera precisa y ajustable. La Tabla 1 presenta estos requerimientos en detalle.

Además de estos requerimientos, durante las discusiones con los investigadores se identificó otra necesidad importante: una herramienta para automatizar la detección del comportamiento de congelamiento en ratas. Hasta la fecha, los investigadores habían estado analizando este comportamiento a través del análisis de videos, lo cual puede ser un proceso laborioso y susceptible a errores humanos.

Para abordar esta necesidad, se decidió incorporar sensores PIR en el sistema de condicionamiento. Los sensores PIR, que pueden detectar el movimiento de los ratas y ofrecen una solución a este problema. Estos sensores tienen el potencial de automatizar la detección del comportamiento de congelamiento, lo que puede ahorrar tiempo a los investigadores y mejorar la precisión de los datos recogidos.

Aunque los sensores PIR se han incluido en el diseño del sistema de condicionamiento con la intención de automatizar la detección del comportamiento de congelamiento en ratas, aún no se han sometido a pruebas para validar su eficacia. La validación de estos sensores será un área importante para abordar en trabajos futuros.

Tabla 1: Requerimientos del sistema.

N °	Descripción
1	El sistema debe proporcionar una interfaz de usuario intuitiva que permita a los investigadores configurar fácilmente los parámetros del experimento
2	El sistema debe generar un choque eléctrico que pueda ser ajustado de 0 a 1.5 mA, dando a los investigadores el control para ajustar la intensidad del estímulo aversivo
3	El sistema debe ser capaz de emitir un tono que pueda ser ajustado para alcanzar al menos 80 dB y una frecuencia de 4 kHz, permitiendo a los investigadores controlar el nivel del estímulo auditivo que los animales experimentan durante las pruebas de condicionamiento
4	El sistema debe permitir el control de la iluminación durante las pruebas de condicionamiento, permitiendo a los investigadores manipular el contexto en el que se realizan las pruebas
5	El sistema debe ser capaz de almacenar automáticamente los parámetros de configuración utilizados en cada experimento en un medio de almacenamiento externo, como un dispositivo USB o una tarjeta de memoria SD.

Esta validación implicará probar los sensores en condiciones de laboratorio y evaluar si pueden detectar con precisión el comportamiento de congelamiento en ratas.

Después de las conversaciones iniciales con los investigadores y de establecer los requerimientos necesarios, se procedió a la creación del sistema de condicionamiento.

7.2. Descripción General del Sistema

El sistema desarrollado es una solución integral diseñada para facilitar la realización de experimentos de condicionamiento del miedo en ratas. Está compuesto por un dispositivo electrónico y una cámara de condicionamiento que trabajan en conjunto para proporcionar un entorno controlado.

El dispositivo electrónico es el núcleo del sistema y está diseñado para controlar y generar los estímulos necesarios durante el experimento de condicionamiento. Está basado en la plataforma Arduino Mega 2560 (Arduino S.r.l.) y el NodeMCU (NodeMCU Open Source Community). Estas tarjetas de desarrollo proporcionan una arquitectura versátil y potente, con amplio rango de posibilidades de conexión, control digital y analógico. El dispositivo cuenta con un firmware desarrollado específicamente para esta aplicación, que permite la configuración y generación de estímulos personalizables, así como la adquisición de datos de sensores PIR.

La cámara de condicionamiento está diseñada con un recinto espacioso que proporciona un entorno controlado para llevar a cabo los experimentos. Está equipada con módulos intercambiables diseñados para la entrega precisa de diferentes tipos de estímulos. Además, se incorporan sensores PIR para detectar el movimiento dentro de la cámara de condicionamiento. En la Tabla 2 se detallan los módulos y sus funciones.

Tabla 2: Módulos intercambiables de la cámara de condicionamiento.

Módulo	Función
Módulo de Audio	Emplea altavoces para reproducir tonos específicos para el estímulo auditivo
Módulo de Iluminación	Utiliza un foco incandescente que se puede encender o apagar para modificar el contexto
Módulo de Sensor	Incorpora sensores PIR para detectar el movimiento dentro de la cámara

En la Figura 14, se muestra de manera detallada el sistema y se indican sus diferentes componentes, incluyendo el dispositivo electrónico, los módulos intercambiables, así como la cámara de condicionamiento.

El sistema desarrollado también permite al usuario ajustar y modificar la intensidad del choque eléctrico de manera precisa y controlada. A través de una interfaz de hardware disponible en el dispositivo electrónico, el usuario puede calibrar la intensidad de la corriente eléctrica utilizada para administrar el estímulo aversivo.

Para facilitar la configuración y control del sistema, se ha desarrollado una GUI que permite al usuario establecer los parámetros de configuración de manera remota. A través de un formulario web se puede definir la duración, intensidad de los estímulos, así como otros parámetros relevantes. Esto proporciona flexibilidad y facilidad de uso al permitir la configuración de los experimentos.

Por último, el sistema ofrece capacidades de almacenamiento de datos mediante el uso de una tarjeta microSD. Los parámetros de configuración del experimento y las señales de movimiento registradas por los sensores PIR se almacenan en la tarjeta microSD junto con marcas de tiempo para facilitar el posterior procesamiento y análisis de los datos.

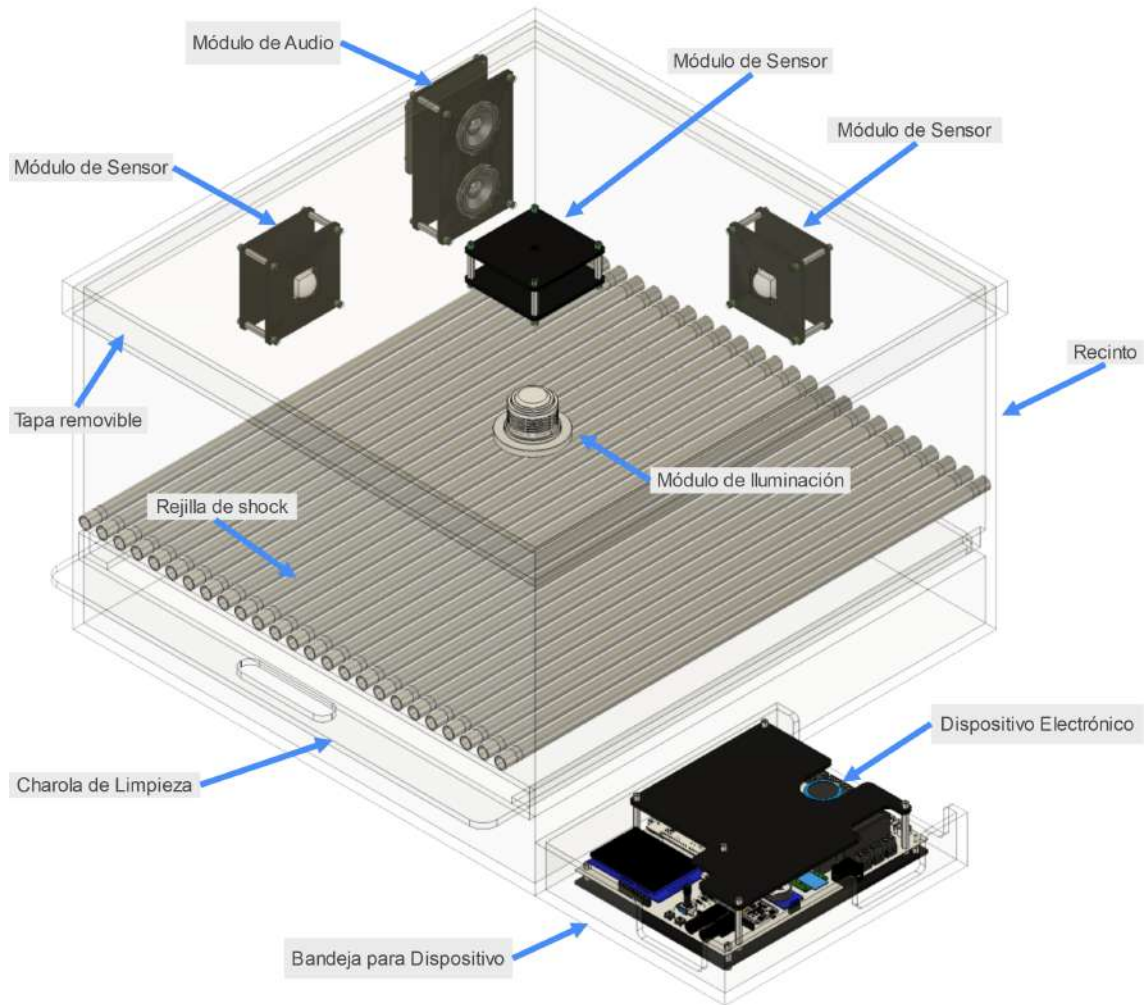


Figura 14: Dibujo CAD del sistema, mostrando el dispositivo electrónico, los módulos intercambiables y la cámara de condicionamiento.

7.3. Diseño del Dispositivo Electrónico

7.3.1. Selección de Componentes y Funcionamiento del Dispositivo

El propósito principal del sistema desarrollado es facilitar la realización de experimentos de condicionamiento del miedo mediante el diseño y la construcción de un dispositivo electrónico de código abierto. Este dispositivo permite la generación y control de estímulos personalizables, la detección de movimiento a través de sensores PIR, la integración de estímulos visuales y auditivos, y la aplicación del choque eléctrico.

En términos de los circuitos integrados, se realizó una selección deliberada de un microcontrolador de alto rendimiento, capaz de ofrecer suficiente capacidad de

procesamiento y una amplia gama de opciones de conectividad. Se optó por la utilización del Arduino Mega 2560 debido a su versatilidad, facilidad de programación y el amplio respaldo disponible dentro de la comunidad de desarrollo. Además, se incluyó la tarjeta NodeMCU para proporcionar conectividad inalámbrica, permitiendo así la configuración remota del dispositivo.

El Arduino Mega 2560, ilustrado en la Figura 15 es una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560. Esta tarjeta es ampliamente utilizada en proyectos de electrónica debido a su arquitectura potente y versátil. El microcontrolador ATmega2560 tiene una arquitectura RISC con una frecuencia de reloj de 16 MHz, lo que le confiere una alta capacidad de procesamiento. Además, cuenta con 256 KB de memoria flash para almacenar el programa y 8 KB de memoria RAM para el almacenamiento temporal de datos.

La tarjeta Arduino Mega 2560 incluye una amplia variedad de pines GPIO que permiten la conexión de diversos componentes y dispositivos externos. Dispone de un total de 54 pines digitales, de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM. Además, cuenta con 16 pines para la lectura de señales analógicas.



Figura 15: La tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560, un componente esencial del sistema que proporciona una plataforma versátil y potente para la conexión y el control digital y analógico.

Por otro lado, la tarjeta de desarrollo NodeMCU, representada en la Figura 16 está basada en el chip ESP8266. Esta tarjeta es ampliamente utilizada en aplicaciones IoT debido a su capacidad de conexión inalámbrica Wi-Fi integrada. El ESP8266 es un microcontrolador de bajo consumo energético y una arquitectura RISC de 32 bits, con una frecuencia de reloj de 80 MHz.

La NodeMCU cuenta con 11 pines GPIO, los cuales se pueden utilizar como entradas o salidas digitales. Además, dispone de un único pin analógico para la lectura de señales analógicas. La tarjeta también ofrece capacidades de comunicación UART, SPI e I2C, permitiendo la conexión con otros dispositivos y periféricos.

Además de la selección de componentes mencionada anteriormente, se optó por incorporar módulos comerciales (*breakout boards*) en el diseño del dispositivo



Figura 16: La tarjeta de desarrollo NodeMCU, que añade capacidades de conexión Wi-Fi al sistema.

electrónico. Estos módulos, diseñados específicamente para simplificar y agilizar el desarrollo de proyectos, ofrecen ventajas significativas en términos de funcionalidad y facilidad de implementación.

Una parte crucial de sistema desarrollado es la capacidad de almacenar y recuperar datos de los experimentos. Para lograr esto, se ha incorporado un módulo de tarjeta microsd (Adafruit MicroSD Card Breakout Board) en el sistema, ilustrada en la Figura 17. Este módulo permite la escritura y lectura de datos en una tarjeta microSD, proporcionando una solución de almacenamiento de datos fácil de usar. La información almacenada en la tarjeta microSD puede ser utilizada en una etapa de procesamiento de datos posterior al experimento.



Figura 17: La Adafruit MicroSD Card Breakout Board, que permite al sistema almacenar y recuperar datos de los experimentos.

El sistema desarrollado también incorpora un módulo RTC (DS3231 AT24C32 IIC Precision RTC, ZYAMY), ilustrado en la Figura 18. Este módulo proporciona una marca de tiempo precisa para cada experimento, permitiendo un análisis detallado de los resultados.

Además, el sistema incluye un módulo de pantalla (2.8 Inches TFT Touch Screen With SD Card Socket For Arduino, ELEGOO), ilustrado en la Figura 19. Esta pantalla táctil permite una interacción intuitiva con el sistema, facilitando la configuración de los experimentos. Esta pantalla brinda una forma conveniente para que el usuario pueda visualizar y verificar la configuración establecida para el experimento de condicionamiento del miedo.



Figura 18: El módulo RTC, componente esencial en el sistema para garantizar un seguimiento preciso del tiempo durante los experimentos.



Figura 19: Módulo de pantalla de 2.8 pulgadas TFT con ranura para tarjeta SD de ELEGOO, que proporciona una interfaz de usuario intuitiva para el sistema.

La integración del dispositivo electrónico con la cámara de condicionamiento se logra mediante el uso de diversos elementos de conexión, como conectores y terminales. El diagrama del funcionamiento del dispositivo electrónico y su integración con la cámara de condicionamiento se muestra de forma detallada en la Figura 20. Esta figura ilustra la interconexión de los diferentes componentes del sistema y brinda una representación visual de cómo se establecen las conexiones físicas y funcionales entre el dispositivo electrónico y la cámara de condicionamiento.

En el presente trabajo, se ha organizado la información de manera que la descripción detallada sobre la generación de cada uno de los estímulos, se aborden en secciones específicas posteriores.

7.3.2. Diseño del Diagrama Electrónico y PCB

Una vez seleccionados los componentes electrónicos, microcontroladores y *breakout boards*, se procedió al diseño de las librerías y componentes CAD necesarios para el proyecto. Se crearon las huellas de la PCB (*footprints*, en inglés), símbolos y modelos 3D correspondientes a cada componente utilizando el software Altium Designer (Altium LLC). Para ello, se tuvieron en cuenta las especificaciones y dimensiones de los componentes según sus hojas de datos (*datasheet*, en inglés).

La Figura 21 muestra una visualización en 3D del diseño de la PCB para el dispositivo electrónico junto con el montaje de sus componentes electrónicos. Esta representación en

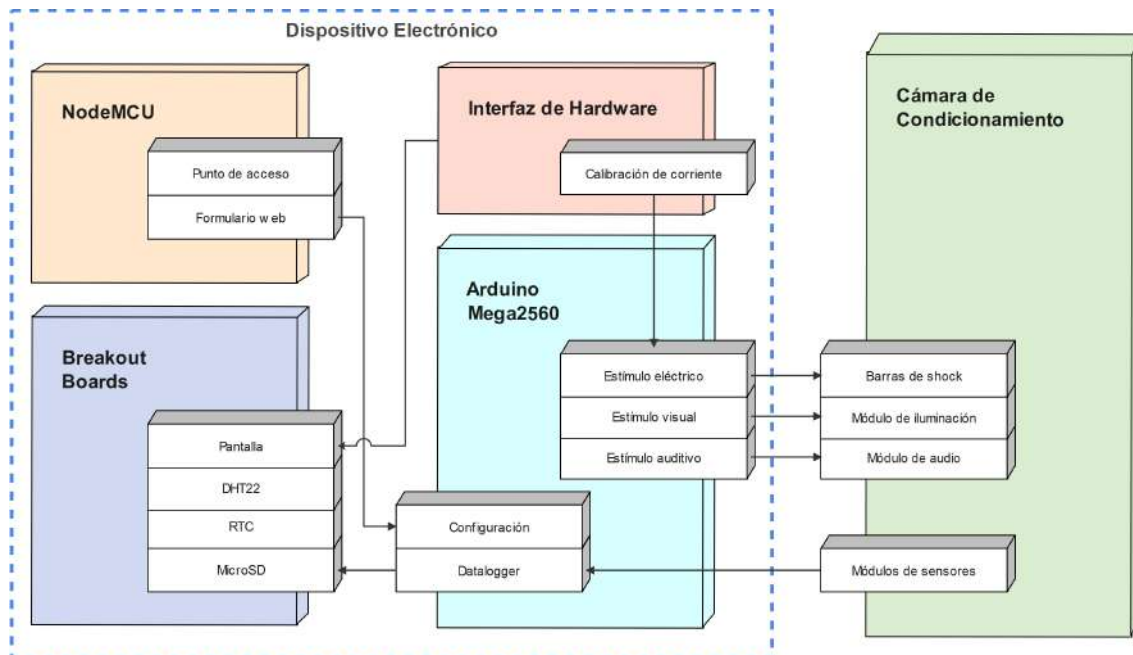


Figura 20: Diagrama de conexión y funcionamiento del sistema de condicionamiento del miedo.

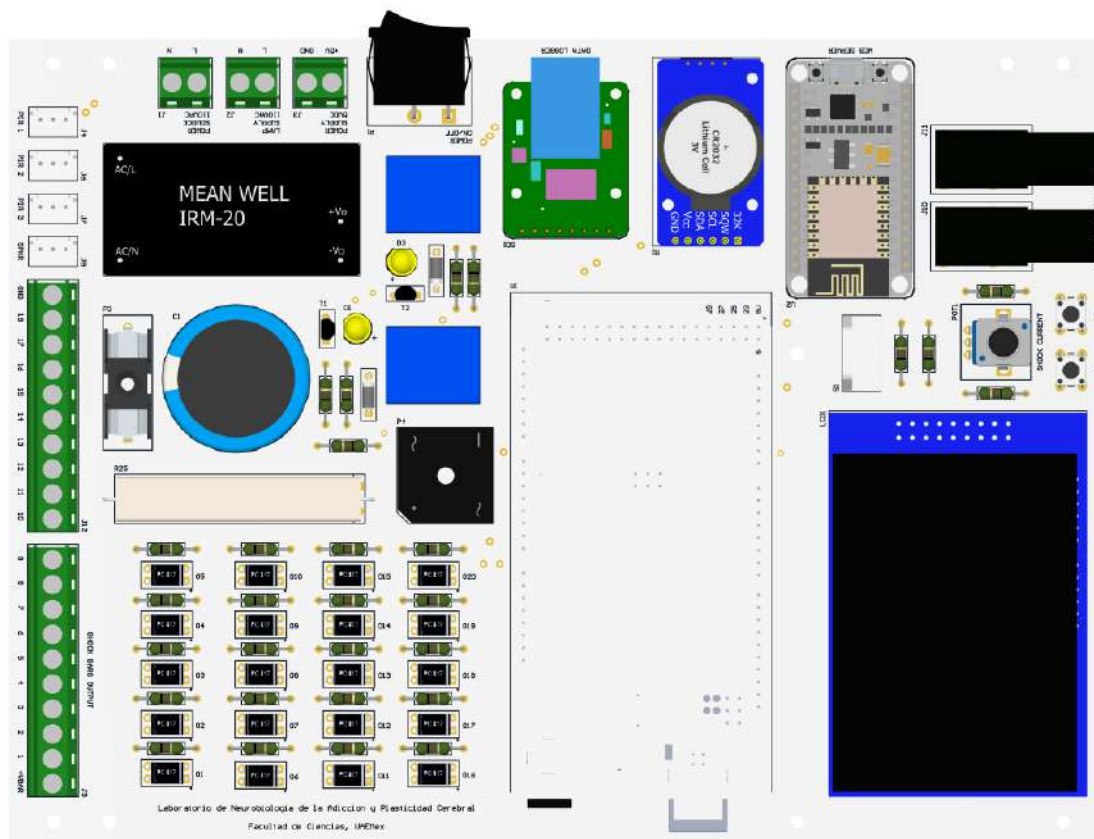
3D proporciona una visión clara y detallada de cómo se distribuyen los componentes en la PCB, permitiendo una mejor comprensión de la disposición espacial de los elementos y su interconexión. Además, se han utilizado modelos 3D precisos de los componentes, obtenidos de GrabCAD (Stratasys Inc.), lo que garantiza una representación fiel de los componentes reales y sus características físicas.

En el diseño de la PCB de doble capa, se consideró la utilización de componentes de montaje a través de orificios (*through-hole*, en inglés) para garantizar una mayor robustez y facilidad en el ensamblaje. Se asignaron los *footprints* y símbolos correspondientes a cada componente en el diseño de la PCB, asegurando la correcta conexión y posicionamiento de los componentes en la placa.

Una vez finalizado el diseño de la PCB, se generaron los archivos necesarios para su fabricación. Estos archivos incluyeron el Gerber (formato de archivo), que contiene la información de las pistas, pads, máscaras y serigrafía, así como el archivo de perforaciones que especifica los orificios necesarios para los componentes *through-hole*.

La fabricación de la PCB se llevó a cabo en China por la empresa JLCPCB (JiaLiChuang Co., Limited). Se enviaron los archivos generados a JLCPCB, quienes se encargaron de la fabricación de la PCB siguiendo las especificaciones proporcionadas.

En el Apéndice A, se incluyen los documentos técnicos esenciales que respaldan el desarrollo del dispositivo electrónico. Estos documentos incluyen el plano integrado de



la PCB, que muestra la disposición detallada de los componentes electrónicos y las conexiones en la placa. Además, se proporcionan los diagramas electrónicos, que ilustran de manera esquemática el diseño y la interconexión de los diferentes componentes del dispositivo. Estos diagramas son una herramienta valiosa para comprender la estructura y el funcionamiento interno del dispositivo.

La implementación de los componentes electrónicos para el dispositivo se detalla en la Tabla 8 que se encuentra en el Apéndice B. Esta lista incluye una variedad de componentes esenciales para el funcionamiento del sistema, como capacitores, diodos, resistencias, relés y otros elementos clave.

7.3.3. Construcción del Gabinete para el Dispositivo Electrónico

Para contener la electrónica del dispositivo se utilizó un enfoque basado en paneles de corte láser y espaciadores M2.5 (diámetro de rosca 2.5 mm) para ensamblar el gabinete. Los paneles fueron cortados en MDF, un material duradero y fácilmente disponible.

El uso de paneles de corte láser permitió obtener cortes precisos y limpios en el

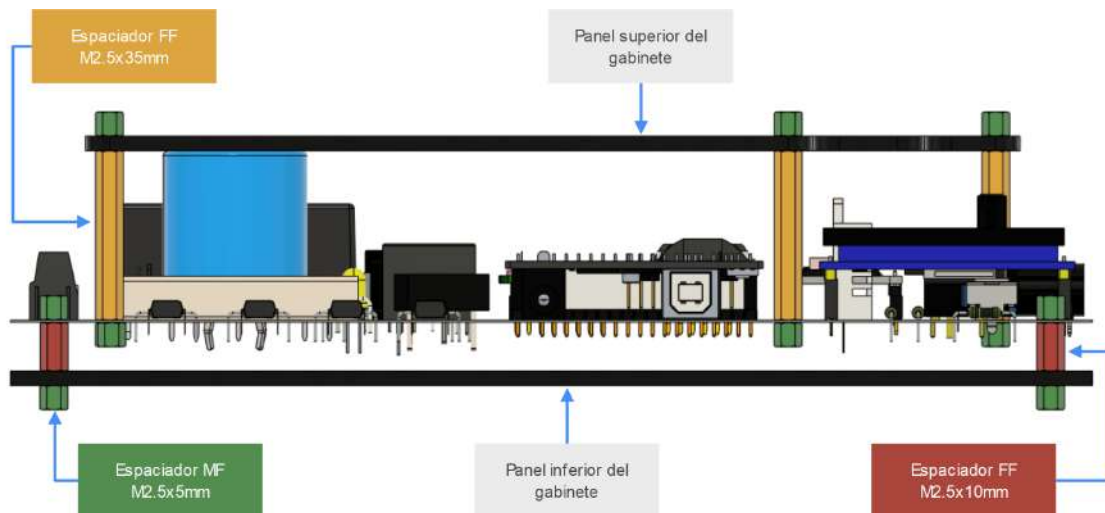


Figura 22: Vista lateral del gabinete construido para la electrónica con la señalización de los espaciadores utilizados.

material, lo que aseguró una adecuada alineación y encaje de las piezas durante el ensamblaje. En la Figura 22 se presenta una vista lateral del gabinete construido para proteger el dispositivo electrónico. La figura muestra los diferentes paneles que componen el gabinete. Para facilitar la comprensión, se han asignado colores distintos a los espaciadores utilizados en el ensamblaje. Los espaciadores FF (*female-female*, en inglés) M2.5x35mm se representan en color amarillo, los espaciadores FF M2.5x10mm se representan en color rojo, y los espaciadores MF (*male-female*, en inglés) M2.5x5mm se representan en color verde. Estos espaciadores desempeñan un papel crucial en el ensamblaje del gabinete, proporcionando la separación adecuada entre los paneles para asegurar una estructura robusta y estable.

Una vez ensamblado, el gabinete se sometió a un acabado con pintura en aerosol negro. Este acabado le proporcionó una apariencia estética elegante y profesional, brindando una presentación visual atractiva. La pintura también ofreció una capa protectora adicional, ayudando a prevenir daños y desgastes en el material.

Se ha diseñado el gabinete teniendo en cuenta la accesibilidad para el usuario, como se muestra en la Figura 23. Se ha prestado especial atención a la disposición de las terminales, conectores e interfaz de hardware, asegurando que estén ubicados de manera conveniente y fácilmente accesibles para facilitar la conexión y manipulación por parte del usuario.

En el Apéndice C, se presentan los planos de los paneles del gabinete y módulos intercambiables del sistema, que describen la forma y las dimensiones precisas de los paneles de MDF. Estos planos permiten una reproducción precisa de estos componentes

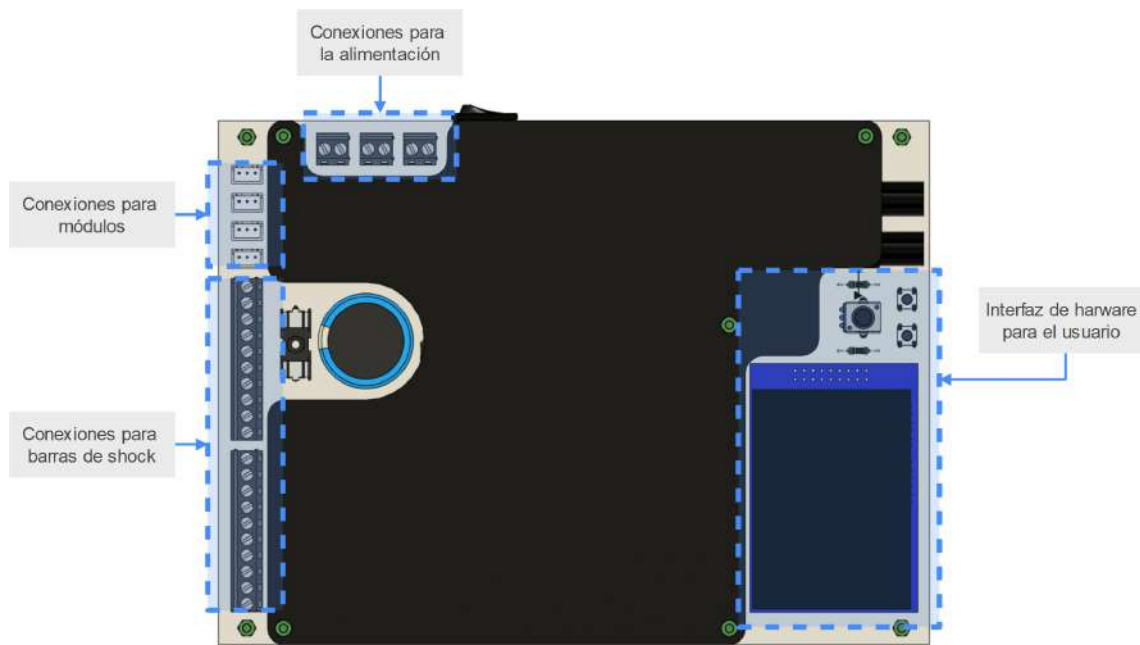


Figura 23: Vista superior del gabinete y el dispositivo electrónico, mostrando las áreas de interacción del usuario.

en caso de que se requiera su replicación o modificación en futuros proyectos.

7.3.4. Desarrollo del Firmware para el Dispositivo

La programación del firmware para las tarjetas de desarrollo Arduino Mega 2560 y NodeMCU se realizó utilizando el lenguaje de programación C++, el framework de Arduino y la plataforma de desarrollo PlatformIO (PlatformIO Labs). Esta combinación de herramientas proporcionó un entorno de desarrollo robusto y eficiente para la implementación del firmware.

Para facilitar el desarrollo del firmware, se hizo uso de diversas librerías de terceros que ofrecían funcionalidades específicas y facilitaban la programación del dispositivo. Estas librerías se integraron en el proyecto a través de PlatformIO, lo que permitió gestionarlas de manera sencilla y mantenerlas actualizadas.

PlatformIO (66) es una plataforma de desarrollo de código abierto que permite la programación de microcontroladores y dispositivos embebidos de forma sencilla y eficiente. Proporciona un IDE que facilita la creación, compilación y carga de firmware en diferentes plataformas.

El proceso para crear un proyecto y programar el firmware utilizando PlatformIO comienza con la instalación del IDE de PlatformIO, que se integra con el entorno de desarrollo de Visual Studio Code (Microsoft). Una vez instalado, se crea un nuevo

proyecto en PlatformIO, que incluye la estructura de directorios necesaria para organizar el código fuente, las librerías y los archivos de configuración. La interfaz de usuario de PlatformIO se muestra en la Figura 24.



Figura 24: Captura de pantalla de PlatformIO, la IDE utilizada para crear el proyecto y programar el firmware del sistema.

Dentro del proyecto de PlatformIO, se crea un archivo de configuración llamado *platformio.ini* donde se especifican los detalles del microcontrolador utilizado, así como las librerías necesarias para el proyecto. Esta configuración incluye la selección del framework, la placa específica a utilizar, las opciones de compilación y las rutas de las librerías adicionales.

A continuación, se crea el archivo de código fuente principal *main.cpp* donde se escribe el código del firmware. En este archivo, se importan las librerías necesarias, se definen las funciones y las rutinas de trabajo del dispositivo. Aquí es donde se implementa la lógica del programa, se configuran los pines GPIO, se establecen las conexiones Wi-Fi, se definen las interrupciones, entre otras tareas específicas del proyecto.

Una vez que el código fuente está listo, se compila el firmware utilizando PlatformIO. Durante este proceso, PlatformIO verifica las dependencias, resuelve las librerías y realiza la compilación del código. Cualquier error o advertencia se muestra en la consola de salida para su corrección.

El siguiente paso es cargar el firmware en el microcontrolador. Para ello, se conecta el dispositivo electrónico al ordenador a través de un cable USB y PlatformIO se encargará

de transferir el firmware compilado.

El firmware del NodeMCU se ha desarrollado para implementar un servidor web y permitir la configuración remota de los parámetros del experimento a través de una GUI. Para lograr esto, se utilizan varias bibliotecas, como *ESP8266WiFi*, *ESPAsyncTCP* y *ESPAsyncWebServer*.

El firmware se encarga de establecer un servidor web, configurar el SSID y la contraseña para la red Wi-Fi. Además, contiene las variables que representan los parámetros del experimento que se pueden configurar a través de la GUI. La Tabla 3 describe estos parámetros en detalle.

Tabla 3: Parámetros del experimento.

Parámetro	Descripción
<i>Experiment Day</i>	Fecha en la que se realiza el experimento
<i>Animal ID</i>	Identificador único para el animal
<i>Experiment Duration</i>	Duración de la exploración del entorno
<i>Tone Frequency</i>	Frecuencia del tono que se reproducirá
<i>Tone Duration</i>	Duración del tono
<i>Shock duration</i>	Duración de la estimulación eléctrica
<i>Movement Analysis</i>	Tiempo durante el cual se registra el movimiento
<i>Wait Interval</i>	Tiempo de espera entre los eventos
<i>Event Repetition</i>	Número total de eventos del experimento

Estos parámetros se pueden configurar a través de una página web generada por el servidor. El formulario HTML incluye campos de entrada correspondientes a los diferentes parámetros, junto con un botón de envío para iniciar el experimento. La Figura 25 muestra la captura de pantalla de la GUI, donde se pueden ingresar los valores deseados en los campos correspondientes.

Al enviar el formulario, los valores ingresados por el usuario se envían al Arduino Mega 2560 a través de una comunicación SPI. Esto permite una configuración conveniente y flexible de los parámetros del experimento sin la necesidad de modificar directamente el firmware. La Figura 26 presenta una representación visual de la conexión del usuario al AP del NodeMCU y el flujo de información subsiguiente para la configuración inalámbrica del experimento.

El firmware desarrollado para el Arduino Mega 2560 ha sido diseñado para ejecutar las tareas específicas para los experimentos de condicionamiento del miedo. Después de recibir los parámetros del experimento a través del NodeMCU, el Arduino Mega 2560 implementa una secuencia ordenada de eventos para llevar a cabo los experimentos de

Conditioning Chamber v0.2	
Experiment Day	Day (n)
Rat ID	Rat ID
Exploration Duration	Duration (s)
Tone Frequency	Frequency (Hz)
Tone Duration	Duration (s)
Shock Duration	Duration (s)
Movement Analysis	Duration (s)
Wait Interval	Duration (s)
Event Repetition	Events (n)

Start Experiment

Figura 25: Captura de pantalla que muestra la GUI del formulario web diseñado para la configuración personalizada de los parámetros del experimento.

condicionamiento del miedo. Siguiendo una estructura predefinida, el Arduino Mega 2560 coordina y controla la ejecución de cada etapa del experimento.

El proceso comienza con una fase de exploración del entorno por parte de la rata, seguida de la generación del tono, el evento de choque, el registro de movimiento y, finalmente, un intervalo de espera entre eventos. En la Figura 27 se muestra el diagrama de las etapas del proceso del experimento de condicionamiento del miedo. Este diagrama ilustra de manera visual las etapas secuenciales que la rata experimenta durante el proceso.

Antes de iniciar el condicionamiento, se permite que la rata realice una fase de exploración del entorno. Durante esta etapa, la rata tiene la oportunidad de familiarizarse con el ambiente experimental, investigar su entorno y adaptarse al nuevo entorno.

Una vez finalizada la etapa de exploración, se genera un tono personalizado utilizando los parámetros configurados previamente. El tono, que puede variar en frecuencia y duración, actúa como un CS que se asociará con el US en las siguientes etapas del experimento.

Después de la generación del tono, se aplica un choque eléctrico a la rata de acuerdo con la duración especificada. Este evento aversivo provoca una respuesta de miedo condicionado en la rata, lo que establece una conexión entre el tono y el choque eléctrico. El objetivo es inducir una respuesta de miedo anticipada al tono en futuras repeticiones del experimento.

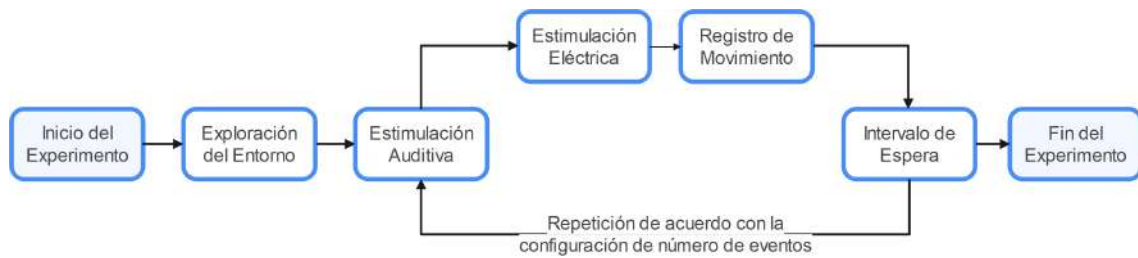


Figura 27: Etapas del proceso del experimento de condicionamiento del miedo, desde la exploración del entorno, la aplicación de los estímulos y el fin del experimento.

muestra un ejemplo del contenido del archivo de las señales analógicas registradas de los sensores PIR.

Tabla 4: Ejemplo del contenido del archivo de las señales de movimiento.

<i>evento1.txt</i>		
457	530	419
463	538	433
457	531	815
455	548	222
465	555	855
452	547	392
462	541	431
...	...	...

Cada valor representa la lectura del ADC para un sensor PIR. Estos datos se capturan después de la aplicación del estímulo eléctrico durante el experimento de condicionamiento del miedo. Los valores de las lecturas del ADC proporcionan información sobre la intensidad de movimiento registrada por cada sensor.

Paralelamente, se genera un archivo de configuración global que almacena de manera centralizada los parámetros de configuración aplicados durante todo el experimento. Este archivo, denominado *configuracion_experimento.txt*, concentra información crucial, como la duración de la etapa de exploración, la frecuencia y duración del tono, la duración de los estímulos aversivos, el intervalo de tiempo entre eventos, y otros parámetros que son configurados a través del formulario web. Adicionalmente, se recopilan los datos de un sensor de temperatura y humedad relativa (DHT22, ASAIR AOSONG) para medir las condiciones ambientales del espacio dónde se realizaron los experimentos y la estampa de tiempo del módulo RTC.

La adopción de esta estructura de archivos garantiza la preservación y la accesibilidad de los datos relevantes para análisis posteriores. Además, promueve una organización sistemática de la información, facilitando su procesamiento y evaluación en función de los objetivos y las hipótesis de investigación planteadas en el contexto del experimento de condicionamiento del miedo.

7.4. Generación de Estímulos y Medición del Movimiento

7.4.1. Estimulación Eléctrica para el Condicionamiento del Miedo y su Calibración

La etapa de potencia está conformada por un elemento de protección ante sobrecorriente (0217.050MXP, Littelfuse), dos dispositivos electromagnéticos de interrupción (833H-1C-S-5VDC, Song Chuan) y un switch interruptor SPST (COM-08837, SparkFun) para controlar la activación del suministro de 110 V_{AC}.

Se incluye un circuito de conversión V_{AC}/V_{DC} (ver Figura 28) compuesto por un puente rectificador (KBPC1010W-G, Comchip Technology) y un capacitor electrolítico (ESMQ351VSN471MR35S, United Chemi-Con) para producir un voltaje constante de aproximadamente +170 V_{DC}.

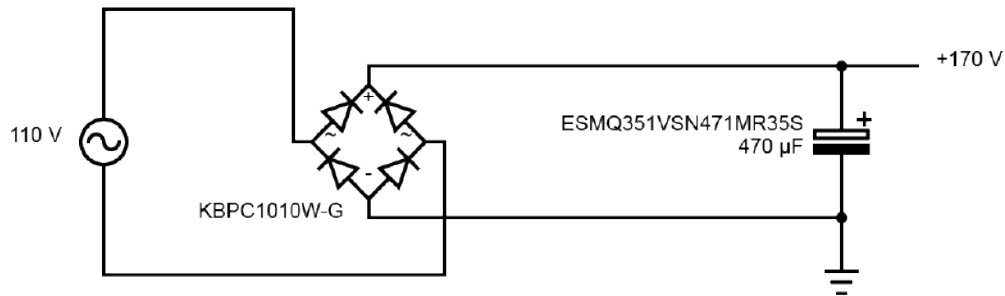


Figura 28: Diagrama electrónico del circuito de conversión V_{AC}/V_{DC}.

Para administrar el choque eléctrico, se utiliza el voltaje constante de +170V_{DC} generado a través del circuito de conversión V_{AC}/V_{DC} descrito anteriormente. Este voltaje pasa a través de una resistencia limitadora de corriente y luego a un potenciómetro (PTV09A-4020F-B504, Bourns) para ajustar la corriente de salida, que el usuario puede manipular a través de la interfaz de hardware. La configuración electrónica que se presenta permite generar un choque eléctrico de aproximadamente 0 - 1.5 mA. Las barras tubulares de acero que se utilizan en la cámara de condicionamiento están conectadas de forma intercalada, esto significa que una está cableada al extremo de

alto voltaje y otra al optoacoplador (TLP240GAF, Toshiba) que se acciona utilizando una señal digital de la tarjeta Arduino Mega 2560 permitiendo cerrar el circuito cuando una rata pisa las barras con diferente potencial eléctrico (ver Figura 29). El dispositivo permite conectar hasta 36 barras para construir la rejilla de la cámara de condicionamiento, logrando personalizar el número de barras de acuerdo con las necesidades del experimento.

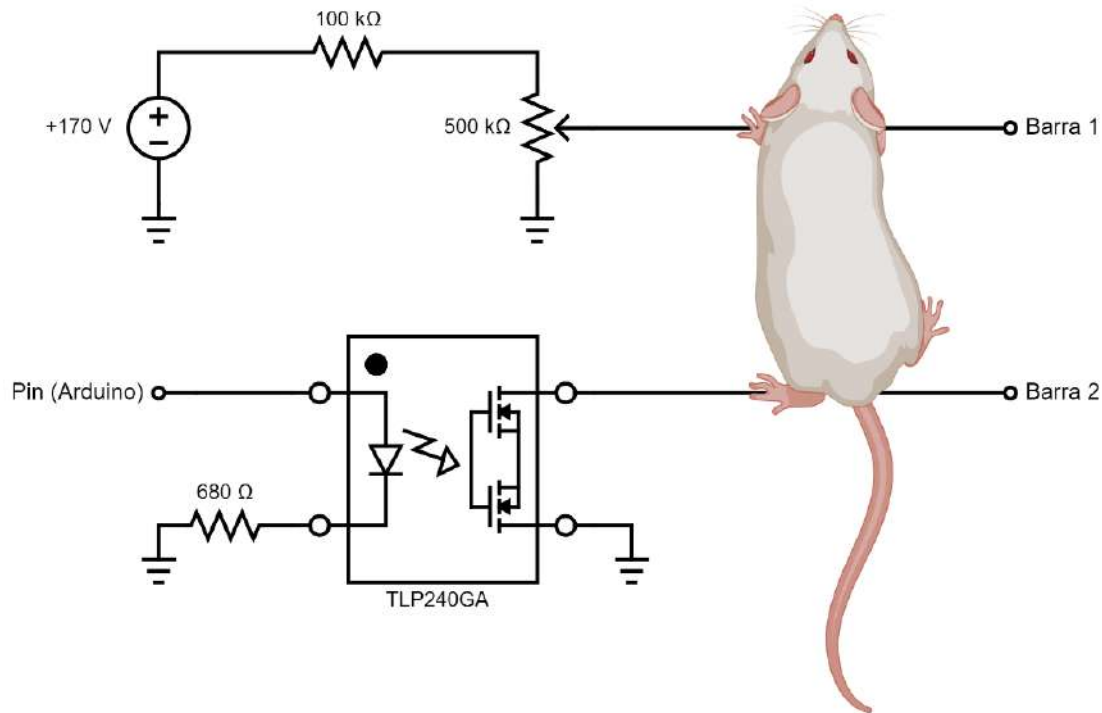


Figura 29: Diagrama electrónico para la generación del choque eléctrico.

La configuración electrónica que describió anteriormente para administrar el choque asume que la impedancia eléctrica de la piel de la rata es de $15 - 25\text{ k}\Omega$. Amaral y cols. (9) han usado valores de $15\text{ k}\Omega$, $20\text{ k}\Omega$ y $25\text{ k}\Omega$ para evaluar los cambios en la intensidad del choque eléctrico generado por su dispositivo, considerando que la impedancia eléctrica de la resistencia de la piel del animal puede variar debido a la humedad y diferentes masas corporales. Sin embargo, sólo Muenzinger y cols. (68) han reportado que para un grupo de ratas de uno a seis meses de edad el valor promedio de la impedancia eléctrica de su piel es de $338\text{ k}\Omega$ con una desviación promedio de $186\text{ k}\Omega$. Algunos trabajos que utilizan el estímulo eléctrico para experimentos de condicionamiento sólo reportan la intensidad de estimulación a la que se expone el animal, más no el dispositivo que se utiliza, ni el método para medir la intensidad del choque eléctrico.

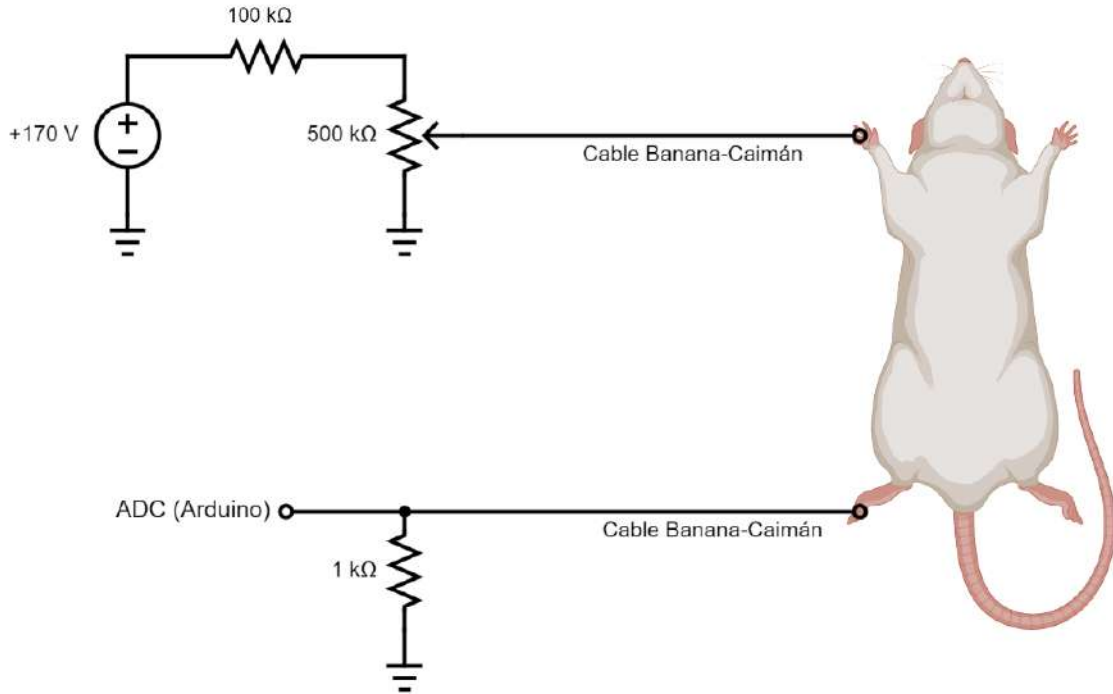


Figura 30: Diagrama electrónico para estimar la intensidad del choque eléctrico.

En este proyecto se presenta un método para estimar la intensidad del choque eléctrico directamente desde el dispositivo. A través de un divisor de voltaje en el circuito de generación de choque eléctrico (ver Figura 30), el dispositivo puede estimar la corriente que pasa por la rata midiendo la caída de voltaje a través de una resistencia de 1 kΩ utilizando un pin de entrada analógica de la tarjeta Arduino. Esto permite leer un valor de voltaje entre 0 - 5 V utilizando el ADC integrado dentro del microcontrolador ATmega2560. El ADC tiene 10 bits de resolución, lo que significa que puede representar un valor digital en el rango de 0 - 1023. La intensidad del choque eléctrico puede entonces calcularse utilizando la Ley de Ohm con la Ecuación 1.

$$\frac{Valor\ ADC \times 5}{1024 \times 1\ k\Omega} = Intensidad\ del\ choque \quad (1)$$

7.4.2. Estimulación Auditiva para el Condicionamiento del Miedo

Para la generación del estímulo auditivo se utiliza una pin de salida PWM de la tarjeta Arduino, de esta forma se puede obtener una señal con un ciclo de trabajo del 50% y de una frecuencia personalizable. La frecuencia del tono puede modificarse dentro de la configuración del experimento.

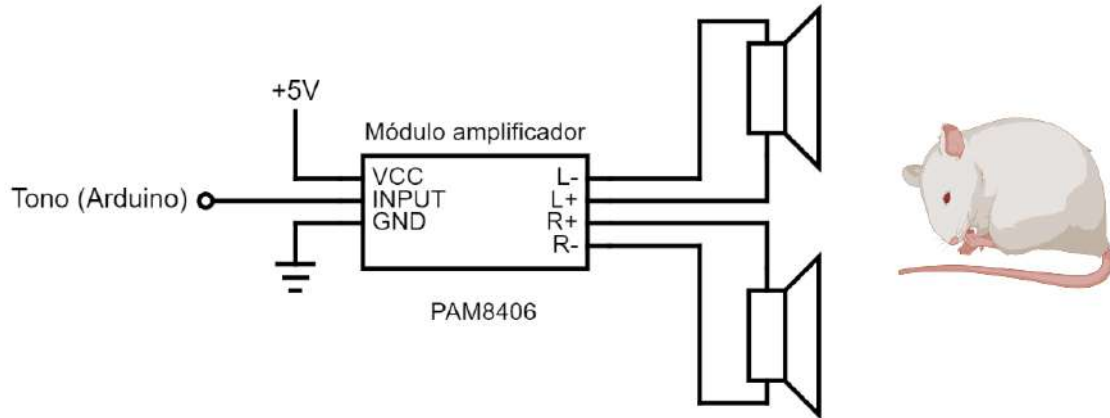


Figura 31: Diagrama electrónico para la generación del estímulo auditivo.

El tono generado es amplificado utilizando un módulo comercial (PAM8406 Digital Amplifier Module, DROK); este módulo amplificador tiene una salida estéreo de doble canal, su fuente de alimentación de +5 V_{DC} proporciona una potencia de salida de 5 W. A través de este componente, se controlan los altavoces externos que se montan en el Módulo de Audio. Se utilizan dos altavoces (1.5" 4 Ohm 3W Full Range Audio Speaker Stereo Woofer Loudspeaker for Arduino, Gikfun), los cuales tienen una potencia máxima de 3 W, impedancia nominal de 4 Ω y frecuencia de respuesta de 20 kHz (figura 31). La Figura 32 ilustra el Módulo de Audio que está compuesto por los componentes electrónicos mencionados y es montado sobre la cámara de condicionamiento.



Figura 32: Representación visual del Módulo de Audio, incluye el amplificador PAM8406 y dos altavoces externos utilizados para la generación y amplificación del tono de estimulación.

7.4.3. Estimulación Visual para el Condicionamiento del Miedo

El estímulo visual se genera a través del encendido de una bombilla incandescente (FI-50T, Voltek), cuyo consumo es de 7.5 W y se alimenta con 110 V_{AC}. El encendido de la bombilla se realiza utilizando un dispositivo electromagnético de interrupción (833H-1C-S-5VDC, Song Chuan). Esta activación es a través de una señal digital generada por la tarjeta Arduino Mega 2560 (ver Figura 33). La bombilla está montada sobre la cámara de condicionamiento a través del Módulo de Iluminación y puede activarse de acuerdo al contexto del experimento, también puede sustituirse por otra bombilla de base E12 con diferente potencia, temperatura o luminosidad.

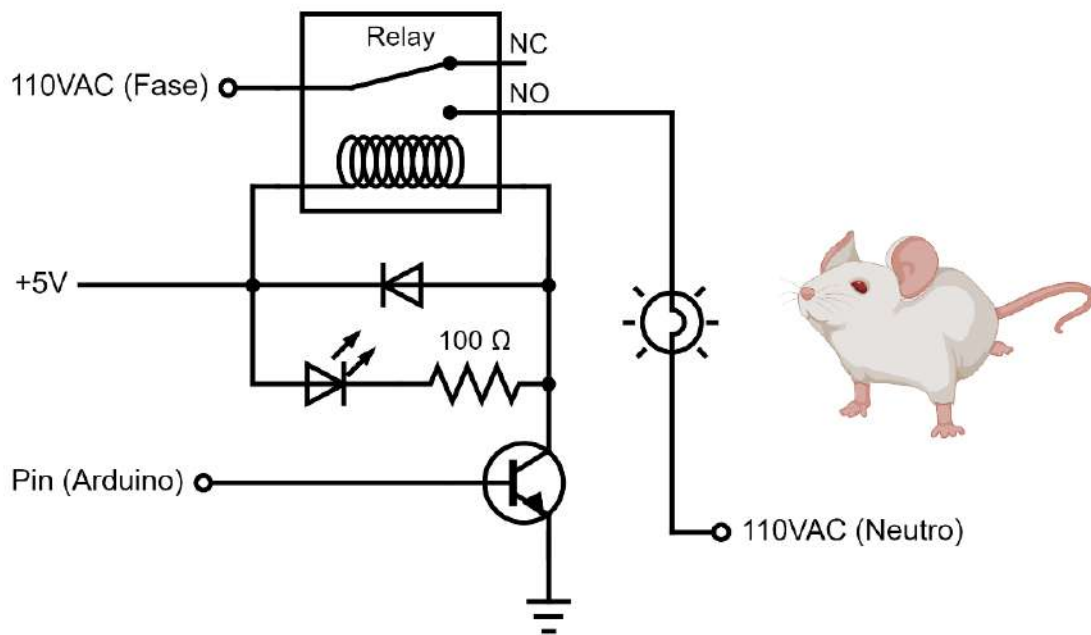


Figura 33: Diagrama electrónico para el encendido de la bombilla.

7.4.4. Medición del Movimiento a través de Sensores PIR

Los sensores PIR utilizan un par de ranuras que son sensibles a la IR, de esta forma pueden detectar la energía térmica del entorno circundante. La IR se enfoca en cada una de las dos ranuras utilizando un lente de Fresnel, permitiendo concentrar la luz y ampliando el área de detección. Cuando el sensor está inactivo, ambas ranuras detectan la misma cantidad de radiación. Cuando pasa un cuerpo caliente, provoca un cambio en la señal diferencial entre las dos ranuras.

El dispositivo tiene la capacidad de adquirir las señales de 3 sensores PIR (HC-SR501, Ai-Thinker Co., Ltd.) para medir el movimiento de la rata durante la

realización de experimentos de condicionamiento. La Figura 34 ilustra el funcionamiento del Módulo de Sensor para el registro de movimiento de las ratas dentro de la cámara de condicionamiento.

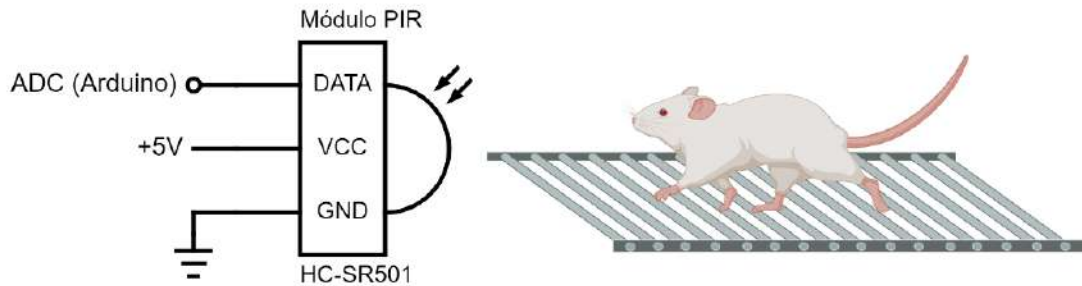


Figura 34: Diagrama electrónico de la conexión de los sensores PIR para medir el movimiento de las ratas.

El HC-SR501 tiene una señal digital de salida que indica cuando la señal diferencial esta sobre o debajo de un umbral ajustable. En este proyecto no se utiliza dicha salida digital, si no que se usa la salida analógica de un amplificador operacional de la tarjeta del sensor que es proporcional a la señal diferencial medida a partir de las dos ranuras y que no está disponible directamente en las terminales del módulo. La Figura 35 ilustra el Módulo de Sensor que consta de los componentes electrónicos mencionados y es montado sobre la cámara de condicionamiento.

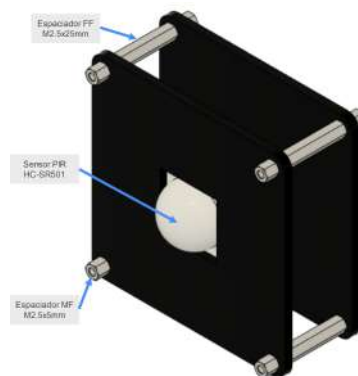


Figura 35: Representación visual del Módulo de Sensor, incluye el sensor PIR HC-SR501.

7.5. Diseño y Construcción de la Cámara de Condicionamiento

El objetivo principal del diseño fue crear una cámara de condicionamiento que proporcionara un entorno controlado para llevar a cabo los experimentos de

condicionamiento del miedo en ratas. Se buscó crear un recinto que permitiera la observación y registro de comportamiento de las ratas, así como la administración precisa de estímulos.

Para el diseño conceptual y estructural de la cámara de condicionamiento, se estableció una colaboración con el LNAPC de la UAEMéx para aprovechar su experiencia en el diseño de entornos experimentales para estudios de comportamiento animal.

La cámara de condicionamiento se diseñó con una rejilla compuesta por 25 barras de acero estratégicamente ubicadas en su interior. Estas barras permiten la administración precisa de estímulos eléctricos controlados durante el proceso de condicionamiento del miedo en las ratas. A continuación, se muestra la Figura 36, una fotografía del sistema de condicionamiento.



Figura 36: Sistema de condicionamiento.

Para facilitar la limpieza y el mantenimiento de la cámara, se incorporó una charola de limpieza que permite la remoción y limpieza de residuos y desechos. Además, se diseñó una tapa removible que proporciona un acceso fácil al interior de la cámara, permitiendo la introducción y extracción conveniente de las ratas durante las sesiones

experimentales. La cámara de condicionamiento también cuenta con perforaciones estratégicas en su estructura para la instalación de los módulos intercambiables.

También se incorporó una bandeja especial para alojar el dispositivo electrónico utilizado en el experimento. Esta bandeja se encuentra estratégicamente ubicada junto a la cámara y está diseñada para proporcionar un espacio dedicado para el dispositivo electrónico. La bandeja fue diseñada teniendo en cuenta la necesidad de facilitar el acceso y la conexión del dispositivo con los diferentes componentes de la cámara. Su ubicación adyacente a la cámara permite una conexión directa entre el dispositivo y otros elementos del sistema. Además de brindar un espacio físico para el dispositivo, la bandeja también cumple una función de protección al mantener el dispositivo resguardado de posibles daños o interferencias durante el experimento. Esto es especialmente importante para garantizar la integridad y el rendimiento adecuado del dispositivo a lo largo de la sesión experimental.

En la Figura 37, se presenta una vista frontal en 2D de la cámara de condicionamiento, resaltando las características previamente mencionadas. Las barras de acero, la charola de limpieza, la tapa removible y la bandeja para el dispositivo electrónico son claramente identificables en la ilustración, brindando una comprensión visual detallada de la estructura y funcionalidad de la cámara.

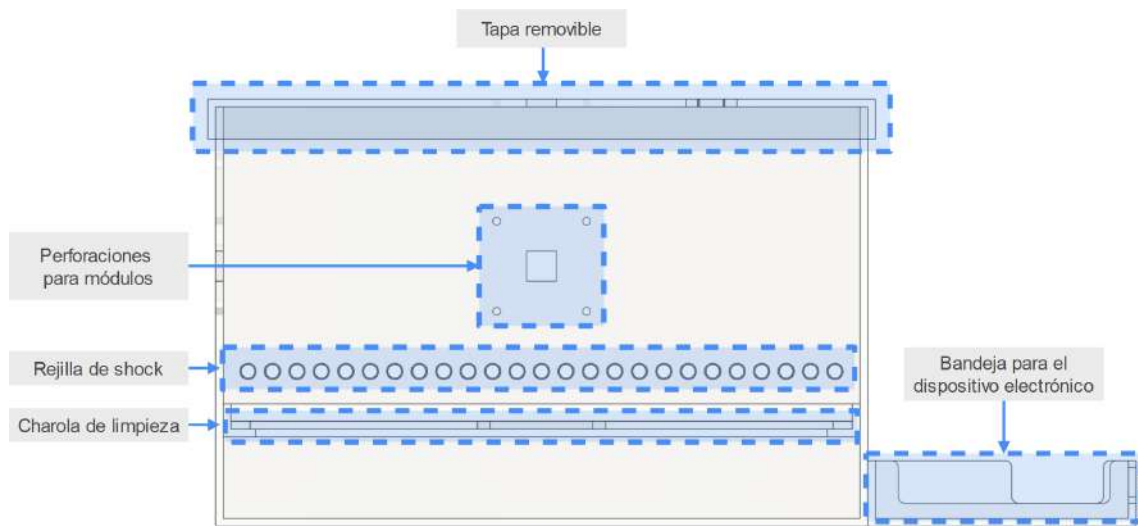


Figura 37: Representación gráfica de la vista frontal en 2D de la cámara de condicionamiento. Se destacan los elementos esenciales que contribuyen a la efectividad y versatilidad del diseño de la cámara de condicionamiento.

La cámara de condicionamiento fue diseñada con unas dimensiones de 508 mm de largo, 508 mm de ancho y 326 mm de altura, proporcionando un espacio suficiente para el movimiento y comportamiento natural de las ratas durante el experimento. En cuanto a

los materiales utilizados, se optó por paneles de acrílico de 6 mm de espesor debido a su resistencia y transparencia, permitiendo una observación clara del interior de la cámara. Estos paneles fueron cortados y ensamblados de manera precisa para formar la estructura de la cámara de condicionamiento.

7.6. Evaluación del Sistema

Las pruebas de usabilidad son un conjunto de métodos que se utilizan para evaluar cómo un grupo objetivo de usuarios interactúa con un sistema en condiciones controladas. Esta etapa es crucial ya que proporciona retroalimentación objetiva acerca del rendimiento del sistema, permitiendo identificar posibles áreas de mejora (69).

El sistema desarrollado fue sometido a pruebas de usabilidad con la colaboración activa de 10 participantes, miembros del LNAPC de la UAEMéx.

Es imperativo destacar que la selección de participantes se llevó a cabo de manera voluntaria entre los miembros activos del LNAPC. No se establecieron requisitos previos de competencia en electrónica, y tampoco se consideraron variables de género o experiencia previa en la manipulación de sistemas electrónicos durante el reclutamiento.

Para garantizar una introducción efectiva al sistema, se llevó a cabo una sesión introductoria. Durante esta sesión, se presentaron los aspectos fundamentales del sistema, su funcionamiento, y los pasos necesarios para su configuración y personalización. Cabe destacar que la sesión introductoria incluyó una demostración práctica, donde se destacaron los procesos de conexión de cables, encendido del dispositivo, calibración de corriente y configuración específica para llevar a cabo un experimento de condicionamiento del miedo. Se incluye una fotografía de esta fase en la Figura 38. A continuación, se detallan los métodos utilizados durante este proceso de evaluación.

7.6.1. Análisis de Tareas

Este análisis permite entender y desglosar el proceso de interacción entre el usuario y el sistema en una serie de tareas específicas, permitiendo identificar posibles dificultades, cuellos de botella y oportunidades para mejorar la eficiencia (70).

La fase de análisis de tareas se diseñó para evaluar la usabilidad del sistema en condiciones prácticas. Un evaluador guió a cada participante a través de una serie de tareas específicas, las cuales incluyeron la configuración del sistema, conexión de cables, calibración de corriente, y otras acciones relevantes para la ejecución exitosa de un experimento de condicionamiento del miedo. Durante la evaluación de las tareas, se



Figura 38: Sesión introductoria del sistema experimental de condicionamiento del miedo para ratas.

centró exclusivamente en determinar el éxito o fracaso de la realización de cada tarea asignada.

En el LNAPC, cada participante se sometió a estas tareas de manera individual, permitiendo una evaluación de uso del sistema en condiciones representativas. A continuación, se presenta una lista que desglosa cada una de estas tareas en subtarefas específicas, junto con los criterios de éxito y fracaso asociados, ofreciendo una descripción detallada de las acciones que implica cada una. La Figura 39 muestra a uno de los participantes interactuando con el sistema en el entorno del LNAPC.

1. **Conexión de módulos intercambiables y cables:** Los participantes deben realizar la conexión de módulos intercambiables y cables en el sistema. El objetivo principal es conectar correctamente todos los componentes a sus terminales correspondientes y validar su funcionamiento adecuado.

a) Identificación de módulos intercambiables:

- Éxito: Los participantes identifican correctamente los módulos intercambiables, como sensores, audio e iluminación.
- Fracaso: Los participantes no logran identificar correctamente al menos uno de los módulos.

b) Conexión de cables de módulos intercambiables:



Figura 39: Participante interactuando con el sistema experimental en el LNAPC.

- Éxito: Los usuarios conectan los cables de los módulos intercambiables a los conectores correspondientes sin problemas.
- Fracaso: Se producen conexiones incorrectas entre los cables y los conectores de los módulos intercambiables.

c) Conexión de cables de la rejilla de choque:

- Éxito: Los participantes asocian correctamente cada cable de la rejilla de choque con su terminal respectiva.
- Fracaso: Hay errores en la asociación de etiquetas entre los cables de la rejilla de choque y las terminales correspondientes.

d) Conexión de alimentación y cables de calibración:

- Éxito: Los usuarios conectan de manera precisa el cable de alimentación AC y los cables banana-caimán para la calibración de corriente a las terminales designadas.
- Fracaso: Se producen errores en la conexión de los cables de alimentación o de calibración.

e) Encendido del dispositivo:

- Éxito: El dispositivo se enciende correctamente después de la conexión de módulos y cables.

- Fracaso: Problemas en el encendido del dispositivo.

2. **Configuración de la conexión Wi-Fi:** Los participantes deben llevar a cabo la configuración de la conexión Wi-Fi hacia el sistema. La interfaz de hardware presenta una pantalla de inicio que exhibe información esencial, incluyendo el SSID, la contraseña y la dirección IP necesarios para establecer la conexión inalámbrica hacia el dispositivo electrónico.

a) Identificación de datos en la pantalla de inicio:

- Éxito: Los usuarios identifican correctamente el SSID, la contraseña y la dirección IP en la pantalla de inicio.
- Fracaso: Los usuarios no identifican correctamente al menos uno de los elementos mencionados.

b) Conexión al AP del dispositivo:

- Éxito: Los usuarios se conectan con éxito al AP del dispositivo mediante Wi-Fi utilizando las credenciales proporcionadas.
- Fracaso: Se presentan problemas en la conexión al AP, como la inserción incorrecta de credenciales.

c) Acceso a la GUI a través de la dirección IP:

- Éxito: Los usuarios acceden con éxito a la GUI al ingresar la dirección IP proporcionada en la pantalla de inicio.
- Fracaso: No logran acceder a la GUI debido a errores en la dirección IP o configuración.

3. **Configuración y ejecución del experimento:** Una vez establecida la conexión exitosa con el dispositivo, los usuarios deben ingresar los siguientes valores específicos en campos predefinidos del formulario que se muestra en la GUI: *Experiment Day: 1, Rat ID: Demo, Exploration Duration: 5 s, Tone Frequency: 4000 Hz, Tone Duration: 5 s, Shock Duration: 1 s, Movement Analysis: 5 s, Wait Interval: 5 s, Event Repetition: 1.*

a) Configuración de parámetros del experimento:

- Éxito: Los usuarios ingresan correctamente los valores especificados en el formulario de configuración del experimento.
- Fracaso: Se cometen errores en la asignación de valores en uno o más campos del formulario.

b) Guardado de ajustes del experimento:

- Éxito: Los usuarios completan con éxito la acción de guardar los ajustes del experimento.
- Fracaso: No se logra guardar la configuración del experimento debido a errores de usuario o del sistema.

c) Confirmación verbal de configuración del experimento:

- Éxito: Los usuarios confirman verbalmente al evaluador que visualizan correctamente los datos en la pantalla de interfaz de hardware.
- Fracaso: Los usuarios no confirman de manera adecuada la visualización de datos en la pantalla de interfaz de hardware o indican problemas en la presentación.

d) Inicio del experimento:

- Éxito: Los usuarios inician correctamente el experimento utilizando el botón designado en el dispositivo.
- Fracaso: Se presentan problemas en el inicio del experimento debido a errores de usuario o del sistema.

e) Confirmación verbal del progreso del experimento:

- Éxito: Los usuarios confirman verbalmente al evaluador el progreso del experimento, utilizando los indicadores visuales de la pantalla del dispositivo, desde el inicio hasta la conclusión del experimento.
- Fracaso: Los usuarios no confirman de manera adecuada el progreso del experimento verbalmente o indican problemas en la interpretación de los indicadores visuales en la pantalla del dispositivo.

4. Calibración de la magnitud del choque eléctrico: Los usuarios realizan la calibración de la magnitud del choque eléctrico mediante la utilización de una resistencia de 20 k Ω con el fin de simular la impedancia eléctrica de la piel de una rata (71).

a) Conexión de la resistencia:

- Éxito: Los usuarios conectan adecuadamente la resistencia de 20 k Ω utilizando los cables banana-caimán.
- Fracaso: La conexión de la resistencia es incorrecta o no se realiza.

b) Accesibilidad a la característica de calibración:

- Éxito: Los usuarios acceden correctamente a la característica de calibración de corriente utilizando la interfaz de hardware y activando el botón indicado en la pantalla.
- Fracaso: Los usuarios encuentran dificultades para acceder a la característica de calibración.

c) Ajuste de la corriente:

- Éxito: Los usuarios utilizan la perilla para ajustar la corriente a 1.0 mA, con un rango de tolerancia de ± 0.1 mA del valor indicado.
- Fracaso: La corriente no se ajusta correctamente dentro del rango establecido.

d) Finalización de la calibración:

- Éxito: Los usuarios finalizan el proceso de calibración de manera adecuada, esperan el tiempo de seguridad establecido y desconectan los cables de la resistencia.
- Fracaso: La finalización de la calibración presenta problemas o no se realiza conforme a las indicaciones.

La descripción detallada de las tareas proporciona un marco para comprender las acciones específicas que los usuarios realizarán en el entorno controlado del LNAPC. Con la ejecución de estas tareas, se espera obtener datos valiosos que contribuyan al mejoramiento del sistema.

7.6.2. Cuestionario SUS

Después de que los participantes completaron el análisis de tareas, se procedió a evaluar la percepción subjetiva de la usabilidad del sistema mediante el cuestionario SUS.

El cuestionario SUS es una herramienta efectiva y eficiente para medir la usabilidad de un sistema. El cuestionario SUS utiliza una escala de Likert con cinco puntos para cada una de las 10 preguntas que componen el cuestionario. La contribución a la puntuación de cada pregunta será entre 0 y 4. Para las preguntas 1, 3, 5, 7 y 9, la contribución es la posición en la escala menos 1. Para las preguntas 2, 4, 6, 8 y 10, la contribución es 5 menos la posición en la escala. Para obtener la puntuación SUS, se suman de las puntuaciones y se multiplican por 2.5 (72).

La puntuación total proporciona una medida general de la usabilidad percibida por el participante, donde puntajes más altos indican una percepción más favorable. Esta

puntuación se puede contextualizar dentro de los criterios generales para evaluar la usabilidad del sistema. En este sentido, es crucial señalar que valores superiores a 60 son reconocidos como indicativos de una usabilidad aceptable, los puntajes superiores a 68 pueden ser interpretados como superiores al promedio, sugiriendo una experiencia de usuario mejorada. Por otro lado, puntajes que sobrepasan los 80 destacan como indicadores de una usabilidad excepcional (73).

Para garantizar eficiencia y facilitar la recopilación de datos, se optó por utilizar Microsoft Forms como plataforma para la implementación del cuestionario. Cada participante recibió un enlace personalizado al formulario digital del cuestionario después de completar las tareas designadas. Las preguntas del Cuestionario SUS que se aplicaron en este proyecto se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Preguntas del cuestionario SUS.

N °	Pregunta
1	Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia
2	El sistema es innecesariamente complejo
3	Creo que el sistema es fácil de usar
4	Creo que necesitaría el apoyo de un experto para poder utilizar este sistema
5	Las funciones integradas en este sistema están muy bien pensadas
6	Creo que este sistema tiene demasiada inconsistencia
7	Imagino que la mayoría de las personas aprenderían a utilizar este sistema muy rápidamente
8	El sistema es muy engorroso de usar
9	Me sentí muy confiado usando el sistema
10	Necesité aprender muchas cosas antes de llegar a operar este sistema

Tras la aplicación del cuestionario SUS, se realizará el cálculo de las puntuaciones SUS y el promedio de la usabilidad global, lo que permitirá realizar un análisis cuantitativo de la percepción de la usabilidad del sistema.

Resultados y Discusión

En esta sección, se presentan y discuten los resultados obtenidos durante la evaluación de la usabilidad del sistema experimental en el entorno del LNAPC. La metodología aplicada, que combina una sesión de introducción detallada, un análisis de tareas y la implementación del cuestionario SUS, ha generado valiosos datos sobre la eficacia y la experiencia del usuario al utilizar el sistema experimental.

8.1. Resultados del Análisis de Tareas

A continuación, se presentan los resultados del análisis de tareas en la Tabla 6. Los porcentajes de éxito para las subtareas indican la proporción de usuarios que completaron exitosamente cada tarea específica con respecto al total de participantes. Para la tarea principal, el porcentaje de éxito se calculó tomando el promedio ponderado de los porcentajes de éxito de sus subtareas asociadas.

Los resultados derivados de las pruebas de usabilidad del sistema experimental de condicionamiento del miedo para ratas reflejan un elevado grado de éxito en la ejecución de las tareas. En específico, tanto la conexión de módulos y cables como la configuración de la conexión Wi-Fi y la calibración de la magnitud del choque eléctrico exhibieron porcentajes de éxito que superaron el 90 %, indicando una ejecución eficaz por parte de los participantes.

Particularmente, la tarea de configuración y ejecución del experimento destacó al alcanzar un rendimiento del 100 %, lo que sugiere un dominio completo por parte de los usuarios en esta fase del sistema.

8.2. Resultados del Cuestionario SUS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a través del cuestionario SUS. Cada pregunta del cuestionario aborda aspectos específicos de la experiencia del usuario, permitiendo una evaluación detallada de la aceptación del sistema.

En la Tabla 7 se muestran los resultados del cuestionario SUS para cada usuario, destacando tanto los puntajes individuales como el promedio de la usabilidad global obtenida a partir de estos.

Los resultados del cuestionario SUS revelan una perspectiva variada sobre la usabilidad del sistema entre los distintos usuarios, pero en general, destacan una

Tabla 6: Resultados del análisis de tareas.

N°	Tarea	% de Éxito
1	Conexión de módulos y cables	92 %
1.a	<i>Identificación de módulos</i>	80 %
1.b	<i>Conexión de cables de módulos</i>	100 %
1.c	<i>Conexión de cables de la rejilla de choque</i>	100 %
1.d	<i>Conexión de alimentación y cables de calibración</i>	90 %
1.e	<i>Encendido del dispositivo</i>	90 %
2	Configuración de la conexión Wi-Fi	93.3 %
2.a	<i>Identificación de datos en la pantalla de inicio</i>	100 %
2.b	<i>Conexión al AP del dispositivo</i>	80 %
2.c	<i>Acceso a la GUI a través de la dirección IP</i>	100 %
3	Configuración y ejecución del experimento	100 %
3.a	<i>Configuración de parámetros del experimento</i>	100 %
3.b	<i>Guardado de ajustes del experimento</i>	100 %
3.c	<i>Confirmación verbal de configuración del experimento</i>	100 %
3.d	<i>Inicio del experimento</i>	100 %
3.e	<i>Confirmación verbal del progreso del experimento</i>	100 %
4	Calibración de la magnitud del choque eléctrico	92.5 %
4.a	<i>Conexión de la resistencia</i>	100 %
4.b	<i>Accesibilidad a la característica de calibración</i>	100 %
4.c	<i>Ajuste de la corriente</i>	80 %
4.d	<i>Finalización de la calibración</i>	90 %

Tabla 7: Resultados de la puntuación SUS.

Usuario	Puntuación SUS
Usuario 1	62.5
Usuario 2	70.0
Usuario 3	75.0
Usuario 4	95.0
Usuario 5	95.0
Usuario 6	85.0
Usuario 7	57.5
Usuario 8	100.0
Usuario 9	70.0
Usuario 10	92.5
Promedio	80.3

tendencia positiva. El promedio global de 80.3 muestra una usabilidad excepcional del sistema, lo que sugiere una experiencia de usuario altamente satisfactoria.

8.3. Discusión de los Resultados

Los resultados del análisis de tareas muestran un promedio ponderado de los porcentajes de éxito para cada una de las tareas superior al 90 %, esto indica un alto nivel de desempeño en general. Sin embargo, es importante destacar que dos subtareas, la identificación de módulos (1.a) y el ajuste de la corriente (4.c), obtuvieron un porcentaje de éxito del 80 %. Esta diferencia en los resultados sugiere posibles áreas de mejora en el diseño y la operación del sistema.

La baja tasa de éxito en la identificación de módulos (1.a) puede deberse a la falta de una orientación clara sobre dónde montar los módulos en la cámara de condicionamiento. Para abordar este problema, sería recomendable proporcionar instrucciones más detalladas o una guía visual que indique claramente la ubicación adecuada para cada módulo en la cámara de condicionamiento.

Por otro lado, la dificultad en el ajuste de la corriente (4.c) puede deberse a una falta de claridad en los pasos del procedimiento de calibración. Es posible que los participantes hayan encontrado confuso el orden de los pasos, como si debían conectar los cables primero, luego manipular los controles de la interfaz de hardware o ajustar la perilla para regular la intensidad. Para mejorar esta tarea, se podría proporcionar una secuencia de pasos más clara y detallada en la pantalla del dispositivo electrónico. Además es muy probable que debido al perfil profesional de los usuarios que en su mayoría eran biólogos, no cuenten con el entrenamiento o conocimientos para comprender de manera teórica que significa el ajuste de corriente en función de la impedancia eléctrica de la piel de la rata.

Los resultados del cuestionario SUS proporcionan una evaluación integral de la usabilidad percibida del sistema por parte de los usuarios. Si bien el promedio global de 80.3 indica una usabilidad excepcional, es importante abordar los casos individuales que obtuvieron puntajes por debajo del umbral considerado como superior al promedio (68). El hecho de que un usuario haya otorgado un puntaje de 57.5 y otro de 62.5 sugiere que existen aspectos del sistema que podrían no haber sido tan satisfactorios para ciertos usuarios.

Los resultados variantes en los puntajes del cuestionario SUS podrían atribuirse a una serie de factores. Por ejemplo, la exposición previa a dispositivos electrónicos y la familiaridad con interfaces similares podrían haber influido en la percepción individual de la usabilidad. Aquellos usuarios con una mayor experiencia en el manejo de

tecnología podrían haber encontrado el sistema más intuitivo y fácil de usar, reflejando así puntajes más altos en el cuestionario. Por otro lado, los usuarios con menos experiencia o familiaridad con dispositivos electrónicos podrían haber experimentado dificultades para comprender la interfaz y las funcionalidades del sistema, lo que podría haber contribuido a puntajes más bajos.

Conclusiones

La realización del sistema experimental de condicionamiento de miedo para ratas abarcó desde su diseño inicial hasta la evaluación de su usabilidad por parte de los miembros del LNAPC. Aunque no se llevó a cabo una implementación práctica de experimentos con un animal durante la etapa de evaluación, es importante destacar que el dispositivo actualmente tiene la capacidad técnica para realizar y ejecutar todas las acciones y tareas presentadas.

Cabe destacar que el trabajo presentado representa la segunda iteración del sistema, que ha sido mejorada a partir de una primera iteración. Aunque la primera iteración del sistema no se incluye en el presente trabajo, su existencia subraya el proceso iterativo que ha experimentado el proyecto. Durante el proceso de desarrollo, se enfrentaron varios desafíos significativos, entre los que se incluyen el diseño y la fabricación de la PCB, así como el ensamblaje del dispositivo electrónico.

Es importante destacar que el sistema final representa un esfuerzo significativo en la conceptualización y materialización del proyecto, y se ha diseñado con la intención de servir como una herramienta útil y eficaz para los investigadores del LNAPC.

Durante el proceso de construcción del sistema experimental, se identificó un área de mejora relacionada con los cables de conexión de las barras de acero, a través de las cuales se administra el choque eléctrico. Se realizaron varios intentos para fijar los cables a las barras, pero se encontraron dificultades con la desconexión de los mismos. En un intento por solucionar este problema, se optó por soldar los cables a las barras, sin embargo, esto resultó en algunas dificultades para transportar el sistema de manera efectiva. Para futuras iteraciones, se sugiere explorar la implementación de una serie de conectores o alguna configuración electrónica a través de una PCB externa, que permita una fijación más robusta de las barras y facilite su manipulación.

Para futuras iteraciones del proyecto, se podría considerar la utilización de componentes SMD, lo que podría reducir significativamente las dimensiones del dispositivo electrónico. En lugar de utilizar *breakout boards*, se podría integrar estos componentes dentro de un diseño único, lo que resultaría en un dispositivo más robusto. Además, sería beneficioso explorar la posibilidad de utilizar un microcontrolador único que integre funcionalidades de Wi-Fi y algún chip externo que permita la activación de la configuración electrónica de las barras para generar el choque eléctrico de manera más eficiente. También se podría considerar la implementación de un sistema operativo en tiempo real, como *FreeRTOS*, en lugar del firmware desarrollado con el framework de

Arduino, para la orquestación de múltiples tareas de forma más precisa y eficiente.

Una característica importante del sistema que se destaca en este trabajo es la capacidad de registrar el movimiento de las ratas a través de los sensores PIR. Este aspecto ha sido implementado con éxito, lo que permite la captura y almacenamiento de datos de los sensores PIR en una tarjeta microSD. Sin embargo, es crucial mencionar que el procesamiento de estos datos y la obtención de métricas útiles para validar el uso de los sensores PIR, en comparación con la puntuación manual del comportamiento de congelamiento del miedo en experimentos de condicionamiento, es un área que requiere ser abordada en futuros trabajos.

Se recibieron comentarios positivos por parte del LNAPC, indicando que el dispositivo satisface los requisitos planteados. Tras la entrega del dispositivo al laboratorio, la siguiente fase implica realizar pruebas con animales.

La inclusión de participantes únicamente provenientes del LNAPC, todos ellos estudiantes de la UAEMéx, puede tener implicaciones en la representatividad de la muestra y en la generalización de los resultados. Si bien esta población proporciona una visión importante sobre la usabilidad del sistema dentro del contexto específico del laboratorio, es importante considerar que la diversidad de usuarios puede influir en las percepciones de usabilidad.

Para futuras evaluaciones, sería beneficioso ampliar la muestra para incluir participantes de diferentes rangos académicos y disciplinas. Esta diversificación de la muestra permitiría obtener una perspectiva más amplia sobre la usabilidad del sistema y evaluar cómo diferentes grupos de usuarios interactúan con él.

Los resultados de las pruebas de usabilidad, que incluyen el análisis de tareas y la aplicación del cuestionario SUS, revelaron un alto nivel de éxito en la realización de cada una de las tareas, con un promedio ponderado de los porcentajes de éxito superior al 90 % para todas las tareas evaluadas. En cuanto al cuestionario SUS, el promedio global de la puntuación fue de 80.3, lo que indica una usabilidad excepcional del sistema, según los estándares establecidos.

Como continuación de este trabajo, se sugiere aplicar nuevamente estas pruebas de usabilidad en el contexto de experimentos reales con animales, bajo un protocolo de experimento controlado. Esto permitirá evaluar la eficacia y la usabilidad del sistema en condiciones de la realidad experimental, lo que ayudará a identificar cualquier área de mejora. Esto podría incluir ajustes en el diseño del sistema, mejoras en la interfaz de usuario, optimización del software y hardware, entre otros aspectos.

Finalmente, cabe destacar que todos los recursos del proyecto, incluyendo los diagramas electrónicos, diseños de PCB, dibujos CAD y código fuente del firmware, han

sido publicados como código abierto en un repositorio público de GitHub (<https://github.com/defdzg/OpenOCC>). Se espera que estos recursos contribuyan de manera significativa al avance del conocimiento en el campo del condicionamiento del miedo, fomentando la colaboración y el avance en la comunidad científica, permitiendo que otros investigadores y desarrolladores puedan beneficiarse de los resultados y contribuir a su mejora continua.

Referencias

- [1] David A. Lieberman. Human Learning and Memory. Cambridge University Press, December 2011. ISBN 978-0-521-87747-3 978-0-521-70139-6 978-1-139-04697-8. doi: 10.1017/CBO9781139046978. URL <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139046978/type/book>. Edition: 1.
- [2] Stephen Maren, K. Luan Phan, and Israel Liberzon. The contextual brain: implications for fear conditioning, extinction and psychopathology. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(6):417–428, June 2013. ISSN 1471-003X, 1471-0048. doi: 10.1038/nrn3492. URL <http://www.nature.com/articles/nrn3492>.
- [3] Ryong-Moon Shin. Cellular Mechanisms in the Amygdala Involved in Memory of Fear Conditioning. In *The Amygdala - A Discrete Multitasking Manager*. IntechOpen, December 2012. ISBN 978-953-51-0908-2. doi: 10.5772/48397. URL <https://www.intechopen.com/chapters/41579>.
- [4] Vitor Gomes. Genetic selection of two new rat lines displaying different levels of conditioned freezing behavior. Technical report, July 2015.
- [5] NIR Video Fear Conditioning (VFC) System for General Use, . URL <https://med-associates.com/product/nir-video-fear-conditioning-vfc-system-for-general-use/>.
- [6] STARTLE AND FEAR CONDITIONING System, . URL <https://panlab.com/en/products/startle-and-fear-conditioning-system-panlab>.
- [7] Coulbourn Habitest System – Texas A&M Institute for Genome Sciences and Society, . URL <https://genomics.tamu.edu/core/coulbourn-habitest-system/>.
- [8] Multi Conditioning System • TSE Systems - Together through Science and Engineering, . URL <https://www.tse-systems.com/service/multi-conditioning-system/>.
- [9] Paulo Aparecido Amaral-Júnior, Flávio Afonso Gonçalves Mourão, Mariana Chamon Ladeira Amancio, Hyorrana Priscila Pereira Pinto, Vinícius Rezende

- Carvalho, Leonardo de Oliveira Guarnieri, Hermes Aguiar Magalhães, and Márcio Flávio Dutra Moraes. A Custom Microcontrolled and Wireless-Operated Chamber for Auditory Fear Conditioning. *Frontiers in Neuroscience*, 13:1193, 2019. ISSN 1662-4548. doi: 10.3389/fnins.2019.01193.
- [10] Mauricio Watanabe Ribeiro, José Firmino Rodrigues Neto, Edgard Morya, Fabrício Lima Brasil, and Mariana Ferreira Pereira de Araújo. OBAT: An open-source and low-cost operant box for auditory discriminative tasks. *Behavior Research Methods*, 50(2):816–825, April 2018. ISSN 1554-3528. doi: 10.3758/s13428-017-0906-6. URL <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0906-6>.
- [11] Christopher J Gabriel, Zachary Zeidler, Benita Jin, Changliang Guo, Caitlin M Goodpaster, Adrienne Q Kashay, Anna Wu, Molly Delaney, Jovian Cheung, Lauren E DiFazio, Melissa J Sharpe, Daniel Aharoni, Scott A Wilke, and Laura A DeNardo. BehaviorDEPOT is a simple, flexible tool for automated behavioral detection based on markerless pose tracking. *eLife*, 11:e74314, August 2022. ISSN 2050-084X. doi: 10.7554/eLife.74314. URL <https://elifesciences.org/articles/74314>.
- [12] Constantinos Eleftheriou, Thomas Clarke, V. Poon, Marie Zechner, and Ian Duguid. Visiomode: An open-source platform for building rodent touchscreen-based behavioral assays. *Journal of Neuroscience Methods*, 386:109779, February 2023. ISSN 0165-0270. doi: 10.1016/j.jneumeth.2022.109779. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027022003065>.
- [13] Thomas Akam, Andy Lustig, James M Rowland, Sampath KT Kapanaiiah, Joan Esteve-Agraz, Mariangela Panniello, Cristina Márquez, Michael M Kohl, Dennis Kätzel, Rui M Costa, and Mark E Walton. Open-source, Python-based, hardware and software for controlling behavioural neuroscience experiments. *eLife*, 11: e67846, January 2022. ISSN 2050-084X. doi: 10.7554/eLife.67846. URL <https://doi.org/10.7554/eLife.67846>. Publisher: eLife Sciences Publications, Ltd.
- [14] Xiaobai Li. Using the conditioned fear stress (CFS) animal model to understand the neurobiological mechanisms and pharmacological treatment of anxiety. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 24(5):241–249, October 2012. ISSN 1002-0829. doi: 10.3969/j.issn.1002-0829.2012.05.001. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4198872/>.
- [15] Iulia Toth, Inga D. Neumann, and David A. Slattery. Social Fear

- Conditioning: A Novel and Specific Animal Model to Study Social Anxiety Disorder. *Neuropsychopharmacology*, 37(6):1433–1443, May 2012. ISSN 1740-634X. doi: 10.1038/npp.2011.329. URL <https://www.nature.com/articles/npp2011329>. Number: 6 Publisher: Nature Publishing Group.
- [16] Laura Luyten, Debora Vansteenwegen, Kris van Kuyck, Loes Gabriëls, and Bart Nuttin. Contextual conditioning in rats as an animal model for generalized anxiety disorder. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 11(2):228–244, June 2011. ISSN 1531-135X. doi: 10.3758/s13415-011-0021-6. URL <https://doi.org/10.3758/s13415-011-0021-6>.
- [17] Thomas C. M. Bienvenu, Cyril Dejean, Daniel Jercog, Bruno Aouizerate, Maël Lemoine, and Cyril Herry. The advent of fear conditioning as an animal model of post-traumatic stress disorder: Learning from the past to shape the future of PTSD research. *Neuron*, 109(15):2380–2397, August 2021. ISSN 0896-6273. doi: 10.1016/j.neuron.2021.05.017. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896627321003573>.
- [18] Mallory E. Bowers and Kerry J. Ressler. An Overview of Translationally Informed Treatments for Posttraumatic Stress Disorder: Animal Models of Pavlovian Fear Conditioning to Human Clinical Trials. *Biological Psychiatry*, 78(5):E15–E27, September 2015. ISSN 0006-3223. doi: 10.1016/j.biopsych.2015.06.008. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006322315004825>.
- [19] R. C. Kessler, A. Sonnega, E. Bromet, M. Hughes, and C. B. Nelson. Posttraumatic stress disorder in the National Comorbidity Survey. *Archives of General Psychiatry*, 52(12):1048–1060, December 1995. ISSN 0003-990X. doi: 10.1001/archpsyc.1995.03950240066012.
- [20] John B. Williamson, Michael S. Jaffee, and Ricardo E. Jorge. Posttraumatic Stress Disorder and Anxiety-Related Conditions. *Continuum (Minneapolis, Minn.)*, 27(6):1738–1763, December 2021. ISSN 1538-6899. doi: 10.1212/CON.0000000000001054.
- [21] E. Leray, A. Camara, D. Drapier, F. Riou, N. Bougeant, A. Pelissolo, K. R. Lloyd, V. Bellamy, J. L. Roelandt, and B. Millet. Prevalence, characteristics and comorbidities of anxiety disorders in France: results from the "Mental Health in General Population" survey (MHGP). *European Psychiatry: The Journal of the*

- Association of European Psychiatrists*, 26(6):339–345, September 2011. ISSN 1778-3585. doi: 10.1016/j.eurpsy.2009.12.001.
- [22] Michael B. VanElzaker, M. Kathryn Dahlgren, F. Caroline Davis, Stacey Dubois, and Lisa M. Shin. From Pavlov to PTSD: The extinction of conditioned fear in rodents, humans, and anxiety disorders. *Neurobiology of Learning and Memory*, 113:3–18, September 2014. ISSN 1074-7427. doi: 10.1016/j.nlm.2013.11.014. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1074742713002426>.
- [23] Antonia V. Seligowski, Lauren A. M. Lebois, Sarah B. Hill, Isabella Kahhale, Jonathan D. Wolff, Tanja Jovanovic, Sherry R. Winternitz, Milissa L. Kaufman, and Kerry J. Ressler. Autonomic responses to fear conditioning among women with PTSD and dissociation. *Depression and Anxiety*, 36(7):625–634, July 2019. ISSN 1520-6394. doi: 10.1002/da.22903.
- [24] Joseph K. Carpenter, Laura Bragdon, and Suzanne L. Pineles. Conditioned physiological reactivity and PTSD symptoms across the menstrual cycle: Anxiety sensitivity as a moderator. *Psychological Trauma: Theory, Research, Practice and Policy*, 14(3):453–461, March 2022. ISSN 1942-969X. doi: 10.1037/tra0001129.
- [25] M. A. Fullana, J. E. Dunsmoor, K. R. J. Schruers, H. S. Savage, D. R. Bach, and B. J. Harrison. Human fear conditioning: From neuroscience to the clinic. *Behaviour Research and Therapy*, 124:103528, January 2020. ISSN 0005-7967. doi: 10.1016/j.brat.2019.103528. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005796719302141>.
- [26] Mohammed R. Milad, Sarah Igoe, and Scott P. Orr. Fear Conditioning in Rodents and Humans. In Jacob Raber, editor, *Animal Models of Behavioral Analysis*, Neuromethods, pages 111–132. Humana Press, Totowa, NJ, 2011. ISBN 978-1-60761-883-6. doi: 10.1007/978-1-60761-883-6_5. URL https://doi.org/10.1007/978-1-60761-883-6_5.
- [27] Tomer Shechner, Melanie Hong, Jennifer C. Britton, Daniel S. Pine, and Nathan A. Fox. Fear conditioning and extinction across development: Evidence from human studies and animal models. *Biological Psychology*, 100:1–12, July 2014. ISSN 0301-0511. doi: 10.1016/j.biopsycho.2014.04.001. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301051114000714>.

- [28] Seth V. Jones, Scott A. Heldt, Michael Davis, and Kerry J. Ressler. Olfactory-Mediated Fear Conditioning in Mice: Simultaneous Measurements of Fear-Potentiated Startle and Freezing. *Behavioral Neuroscience*, 119:329–335, 2005. ISSN 1939-0084. doi: 10.1037/0735-7044.119.1.329. Place: US Publisher: American Psychological Association.
- [29] Stephen Maren. Pavlovian fear conditioning as a behavioral assay for hippocampus and amygdala function: cautions and caveats. *European Journal of Neuroscience*, 28(8):1661–1666, 2008. ISSN 1460-9568. doi: 10.1111/j.1460-9568.2008.06485.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1460-9568.2008.06485.x>. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1460-9568.2008.06485.x>.
- [30] Jeanne M. Wehner and Richard A. Radcliffe. Cued and Contextual Fear Conditioning in Mice. *Current Protocols in Neuroscience*, 27(1):8.5C.1–8.5C.14, 2004. ISSN 1934-8576. doi: 10.1002/0471142301.ns0805cs27. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0471142301.ns0805cs27>. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/0471142301.ns0805cs27>.
- [31] Peter Curzon, Nathan R. Rustay, and Kaitlin E. Browman. Cued and Contextual Fear Conditioning for Rodents. In Jerry J. Buccafusco, editor, *Methods of Behavior Analysis in Neuroscience*, Frontiers in Neuroscience. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton (FL), 2nd edition, 2009. ISBN 978-1-4200-5234-3. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK5223/>.
- [32] N. S. Burghardt and E. P. Bauer. Acute and chronic effects of selective serotonin reuptake inhibitor treatment on fear conditioning: Implications for underlying fear circuits. *Neuroscience*, 247:253–272, September 2013. ISSN 0306-4522. doi: 10.1016/j.neuroscience.2013.05.050. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306452213004831>.
- [33] Despina E Ganella and Jee Hyun Kim. Developmental rodent models of fear and anxiety: from neurobiology to pharmacology. *British Journal of Pharmacology*, 171(20):4556–4574, 2014. ISSN 1476-5381. doi: 10.1111/bph.12643. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/bph.12643>. _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/bph.12643>.
- [34] Andrea Berardi, Viviana Trezza, and Patrizia Campolongo. Modeling specific phobias and posttraumatic stress disorder in rodents: the challenge to convey

- both cognitive and emotional features. *Reviews in the Neurosciences*, 23(5-6):645–657, November 2012. ISSN 2191-0200. doi: 10.1515/revneuro-2012-0054. URL <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/revneuro-2012-0054/html>. Publisher: De Gruyter.
- [35] P. Meuth, S. Gaburro, J. Lesting, A. Legler, M. Herty, T. Budde, S. G. Meuth, T. Seidenbecher, B. Lutz, and H.-C. Pape. Standardizing the analysis of conditioned fear in rodents: a multidimensional software approach. *Genes, Brain, and Behavior*, 12(5):583–592, July 2013. ISSN 1601-183X. doi: 10.1111/gbb.12040.
- [36] Verónica S. Valentinuzzi, Daniel E. Kolker, Martha Hotz Vitaterna, Kazuhiro Shimomura, Andrew Whiteley, Sharon Low-Zeddies, Fred W. Turek, Elenice A.M. Ferrari, Richard Paylor, and Joseph S. Takahashi. Automated Measurement of Mouse Freezing Behavior and its Use for Quantitative Trait Locus Analysis of Contextual Fear Conditioning in (BALB/cJ × C57BL/6J)F2 Mice. *Learning & Memory*, 5(4):391–403, September 1998. ISSN 1072-0502. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC311259/>.
- [37] Ilga Misane, Philip Tovote, Michael Meyer, Joachim Spiess, Sven Ove Ogren, and Oliver Stiedl. Time-dependent involvement of the dorsal hippocampus in trace fear conditioning in mice. *Hippocampus*, 15(4):418–426, 2005. ISSN 1050-9631. doi: 10.1002/hipo.20067.
- [38] Thomas Fitch, Benjamin Adams, Stephen Chaney, and Robert Gerlai. Force transducer-based movement detection in fear conditioning in mice: a comparative analysis. *Hippocampus*, 12(1):4–17, 2002. ISSN 1050-9631. doi: 10.1002/hipo.10009.
- [39] Christopher Wiesbrock, Simon Musall, and Björn M. Kampa. A flexible Python-based touchscreen chamber for operant conditioning reveals improved visual perception of cardinal orientations in mice. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 16:866109, October 2022. ISSN 1662-5102. doi: 10.3389/fncel.2022.866109. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fncel.2022.866109/full>.
- [40] Philip Vassilev, Esmeralda Fonseca, Giovanni Hernandez, Andrea Haree Pantoja-Urban, Michel Giroux, Dominique Nouel, Elise Van Leer, and Cecilia Flores. Custom-Built Operant Conditioning Setup for Calcium Imaging and Cognitive Testing in Freely Moving Mice. *eneuro*, 9(1):ENEURO.0430–21.2022, January

2022. ISSN 2373-2822. doi: 10.1523/ENEURO.0430-21.2022. URL <https://www.eneuro.org/lookup/doi/10.1523/ENEURO.0430-21.2022>.
- [41] Hirotaka Shoji, Keizo Takao, Satoko Hattori, and Tsuyoshi Miyakawa. Contextual and Cued Fear Conditioning Test Using a Video Analyzing System in Mice. *Journal of Visualized Experiments*, (85):50871, March 2014. ISSN 1940-087X. doi: 10.3791/50871.
- [42] S. Rendall, R. Shansky, and H. Brenhouse. A Platform for the Assessment of Brainwide c-Fos Induction Following Fear Conditioning in Mice. April 2016.
- [43] Bridget A. Matikainen-Ankney, Marcial Garmendia-Cedillos, Mohamed Ali, Jonathan Krynitsky, Ghadi Salem, Nanami L. Miyazaki, Tom Pohida, and Alexxai V. Kravitz. Rodent Activity Detector (RAD), an Open Source Device for Measuring Activity in Rodent Home Cages. *eneuro*, 6(4):ENEURO.0160–19.2019, July 2019. ISSN 2373-2822. doi: 10.1523/ENEURO.0160-19.2019. URL <https://www.eneuro.org/lookup/doi/10.1523/ENEURO.0160-19.2019>.
- [44] Stephan Anagnostaras, Suzanne Wood, Tristan Shuman, Denise Cai, Arthur LeDuc, Karl Zurn, Brooks Zurn, Jennifer Sage, and Gerald Herrera. Automated Assessment of Pavlovian Conditioned Freezing and Shock Reactivity in Mice Using the Video Freeze System. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 4, September 2010. doi: 10.3389/fnbeh.2010.00158.
- [45] Samantha R. White, Linda M. Amarante, Alexxai V. Kravitz, and Mark Laubach. The Future Is Open: Open-Source Tools for Behavioral Neuroscience Research. *eneuro*, 6(4):ENEURO.0223–19.2019, July 2019. ISSN 2373-2822. doi: 10.1523/ENEURO.0223-19.2019. URL <https://www.eneuro.org/lookup/doi/10.1523/ENEURO.0223-19.2019>.
- [46] C. Boldyreff, J. Lavery, D. Nutter, and S. Rank. Open-Source Development Processes and Tools. May 2003. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/Open-Source-Development-Processes-and-Tools-Boldyreff-Lavery/c25861d7b2e1df12b2fb723cc99adfcfe444486a>.
- [47] Josh Lerner and Jean Tirole. Some Simple Economics of Open Source. *The Journal of Industrial Economics*, 50(2):197–234, March 2003. ISSN 00221821, 14676451. doi: 10.1111/1467-6451.00174. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-6451.00174>.

- [48] Hiroaki Takahashi. Automated measurement of freezing time to contextual and auditory cues in fear conditioning as a simple screening method to assess learning and memory abilities in rats. *The Journal of Toxicological Sciences*, 29(1):53–61, February 2004. ISSN 0388-1350. doi: 10.2131/jts.29.53.
- [49] J. Panksepp. Emotions. In George F. Koob, Michel Le Moal, and Richard F. Thompson, editors, *Encyclopedia of Behavioral Neuroscience*, pages 477–484. Academic Press, Oxford, January 2010. ISBN 978-0-08-045396-5. doi: 10.1016/B978-0-08-045396-5.00087-7. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080453965000877>.
- [50] D. Hope and R. Dienstbier. Perspectives on anxiety, panic, and fear. 1996. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/Perspectives-on-anxiety%2C-panic%2C-and-fear-Hope-Dienstbier/6674743f42904382dd8e5e89ddc4115c659075b0>.
- [51] The biology of fear and anxiety. 2015. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/The-biology-of-fear-and-anxiety/2720371afaf4df4c723b05ca0e61e1beab50e37a>.
- [52] Jinxia Wang, Xiaoying Sun, Jiachen Lu, HaoRan Dou, and Yi Lei. Generalization gradients for fear and disgust in human associative learning. *Scientific Reports*, 11(1):14210, July 2021. ISSN 2045-2322. doi: 10.1038/s41598-021-93544-7. URL <https://www.nature.com/articles/s41598-021-93544-7>.
- [53] Pan Feng, Tingyong Feng, Zhencai Chen, and Xu Lei. Memory consolidation of fear conditioning: Bi-stable amygdala connectivity with dorsal anterior cingulate and medial prefrontal cortex. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(11):1730–1737, November 2014. ISSN 1749-5024, 1749-5016. doi: 10.1093/scan/nst170. URL <https://academic.oup.com/scan/article/9/11/1730/1682665>.
- [54] Franziska Labrenz, Adriane Icenhour, Marc Schlamann, Michael Forsting, Ulrike Bingel, and Sigrid Elsenbruch. From Pavlov to pain: How predictability affects the anticipation and processing of visceral pain in a fear conditioning paradigm. *NeuroImage*, 130:104–114, April 2016. ISSN 10538119. doi: 10.1016/j.neuroimage.2016.01.064. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S105381191600094X>.
- [55] Marziah Hakim, Andrew R. Battle, Arnauld Belmer, Selena E. Bartlett, Luke R. Johnson, and Fatemeh Chehrehasa. Pavlovian Olfactory Fear Conditioning: Its

- Neural Circuitry and Importance for Understanding Clinical Fear-Based Disorders. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 12:221, September 2019. ISSN 1662-5099. doi: 10.3389/fnmol.2019.00221. URL <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnmol.2019.00221/full>.
- [56] Chandrashekhkar D. Borkar and Jonathan P. Fadok. A Novel Pavlovian Fear Conditioning Paradigm to Study Freezing and Flight Behavior. *Journal of Visualized Experiments*, (167):61536, January 2021. ISSN 1940-087X. doi: 10.3791/61536.
- [57] S. Jarius and B. Wildemann. And Pavlov still rings a bell: summarising the evidence for the use of a bell in Pavlov’s iconic experiments on classical conditioning. *Journal of Neurology*, 262(9):2177–2178, September 2015. ISSN 0340-5354, 1432-1459. doi: 10.1007/s00415-015-7858-5. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00415-015-7858-5>.
- [58] Tom Beckers, Dirk Hermans, Iris Lange, Laura Luyten, Sara Scheveneels, and Bram Vervliet. Understanding clinical fear and anxiety through the lens of human fear conditioning. *Nature Reviews Psychology*, 2(4):233–245, April 2023. ISSN 2731-0574. doi: 10.1038/s44159-023-00156-1. URL <https://www.nature.com/articles/s44159-023-00156-1>. Number: 4 Publisher: Nature Publishing Group.
- [59] Tina B. Lonsdorf, Mareike M. Menz, Marta Andreatta, Miguel A. Fullana, Armita Golkar, Jan Haaker, Ivo Heitland, Andrea Hermann, Manuel Kuhn, Onno Kruse, Shira Meir Drexler, Ann Meulders, Frauke Nees, Andre Pittig, Jan Richter, Sonja Römer, Youssef Shiban, Anja Schmitz, Benjamin Straube, Bram Vervliet, Julia Wendt, Johanna M. P. Baas, and Christian J. Merz. Don’t fear ‘fear conditioning’: Methodological considerations for the design and analysis of studies on human fear acquisition, extinction, and return of fear. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 77:247–285, June 2017. ISSN 0149-7634. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.02.026. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149763416308466>.
- [60] Vanessa A. Van Ast, Floris Klumpers, Raoul P. P. Grasman, Angelos-Miltiadis Kryptos, and Karin Roelofs. Postural freezing relates to startle potentiation in a human fear-conditioning paradigm. *Psychophysiology*, 59(4), April 2022. ISSN 0048-5772, 1469-8986. doi: 10.1111/psyp.13983. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/psyp.13983>.
- [61] Karin Roelofs. Freeze for action: neurobiological mechanisms in animal and human

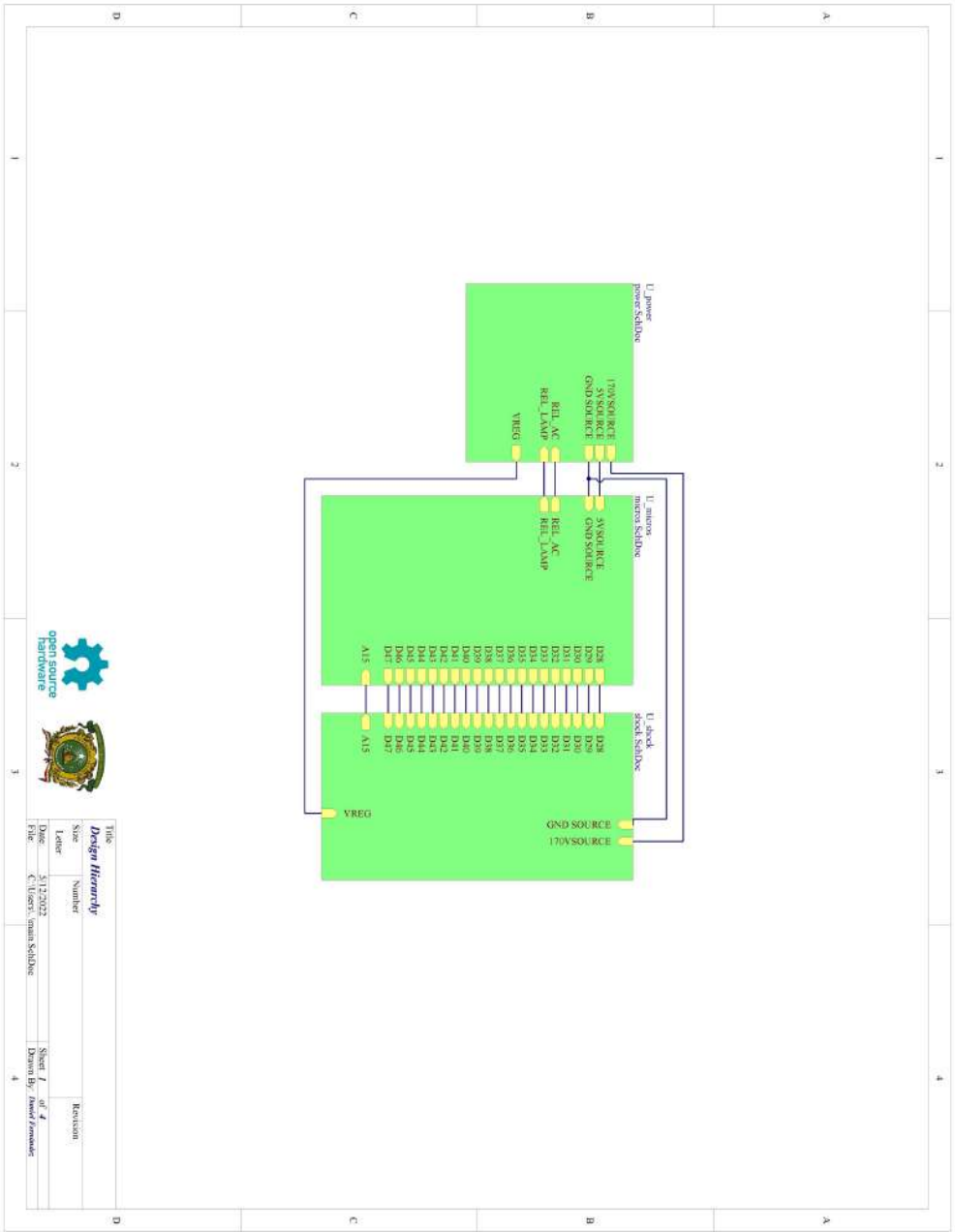
- freezing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1718):20160206, February 2017. doi: 10.1098/rstb.2016.0206. URL <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2016.0206>. Publisher: Royal Society.
- [62] Carolina Macêdo-Souza, Silvia S. Maissonette, Claudio C. Filgueiras, J. Landeira-Fernandez, and Thomas E. Krahe. Cued Fear Conditioning in Carioca High- and Low-Conditioned Freezing Rats. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 13, 2020. ISSN 1662-5153. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbeh.2019.00285>.
- [63] Amanda Chu, Christa B. Michel, Nicholas T. Gordon, Katherine E. Hanrahan, Aleah M. DuBois, David C. Williams, and Michael A. McDannald. A fear conditioned cue orchestrates a suite of behaviors, August 2022. URL <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2022.08.05.502178v1>. Pages: 2022.08.05.502178 Section: New Results.
- [64] Hendrik W. Steenland and Min Zhuo. Neck electromyography is an effective measure of fear behavior. *Journal of Neuroscience Methods*, 177(2):355–360, March 2009. ISSN 01650270. doi: 10.1016/j.jneumeth.2008.10.020. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165027008006389>.
- [65] Adriana Chammas, Manuela Quaresma, and Cláudia Mont’Alvão. A Closer Look on the User Centred Design. *Procedia Manufacturing*, 3:5397–5404, January 2015. ISSN 2351-9789. doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.656. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915006575>.
- [66] PlatformIO. PlatformIO: Your Gateway to Embedded Software Development Excellence. URL <https://platformio.org>.
- [67] Fatih Erden, Ali Alkar, and Ahmet Cetin. A robust system for counting people using an infrared sensor and a camera. *Infrared Physics & Technology*, 72, August 2015. doi: 10.1016/j.infrared.2015.07.019.
- [68] K. F. Muenzinger and R. H. Mize. The sensitivity of the white rat to electric shock: threshold and skin resistance. *Journal of Comparative Psychology*, 15:139–148, 1933. ISSN 0093-4127. doi: 10.1037/h0074547. Place: US Publisher: Williams & Wilkins Company.

- [69] J. Bastien. Usability testing: A review of some methodological and technical aspects of the method. *International journal of medical informatics*, 79:e18–23, May 2009. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2008.12.004.
- [70] Stella Mills. The importance of task analysis in Usability Context Analysis - Designing for fitness for purpose. *Behaviour & Information Technology - Behaviour & IT*, 19:57–68, January 2000. doi: 10.1080/014492900118795.
- [71] Gary Walters and Carole Tullis. Skin resistance changes in the rat during repeated encounters with electric shock. *Psychonomic Science*, 5(9):359–360, September 1966. ISSN 0033-3131. doi: 10.3758/BF03328438. URL <https://doi.org/10.3758/BF03328438>.
- [72] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189, November 1995.
- [73] Andrew T. Jebb, Vincent Ng, and Louis Tay. A Review of Key Likert Scale Development Advances: 1995–2019. *Frontiers in Psychology*, 12:637547, May 2021. ISSN 1664-1078. doi: 10.3389/fpsyg.2021.637547. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8129175/>.

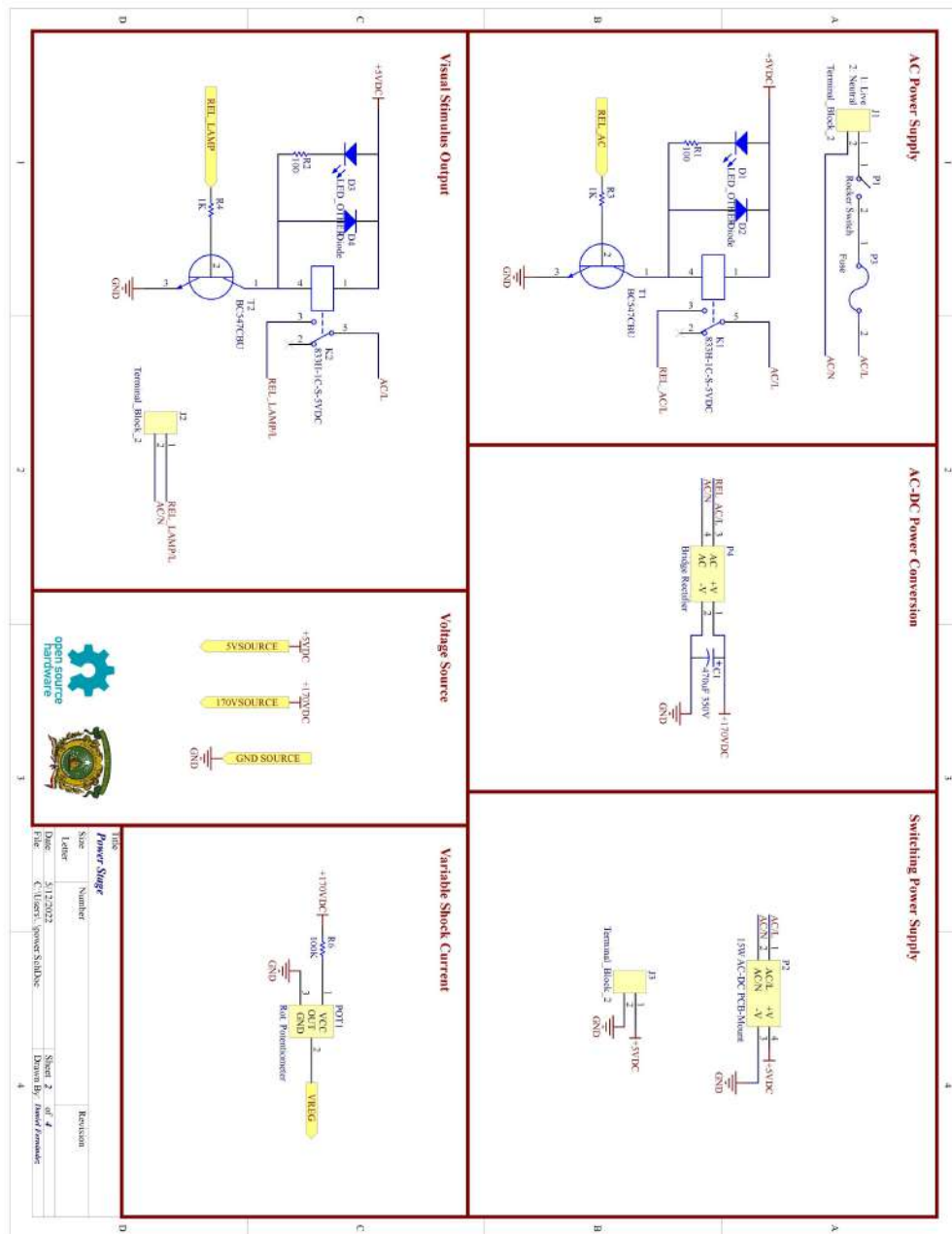
11.1.1. Plano Integrado de la PCB: Diseño y Esquema de Conexiones



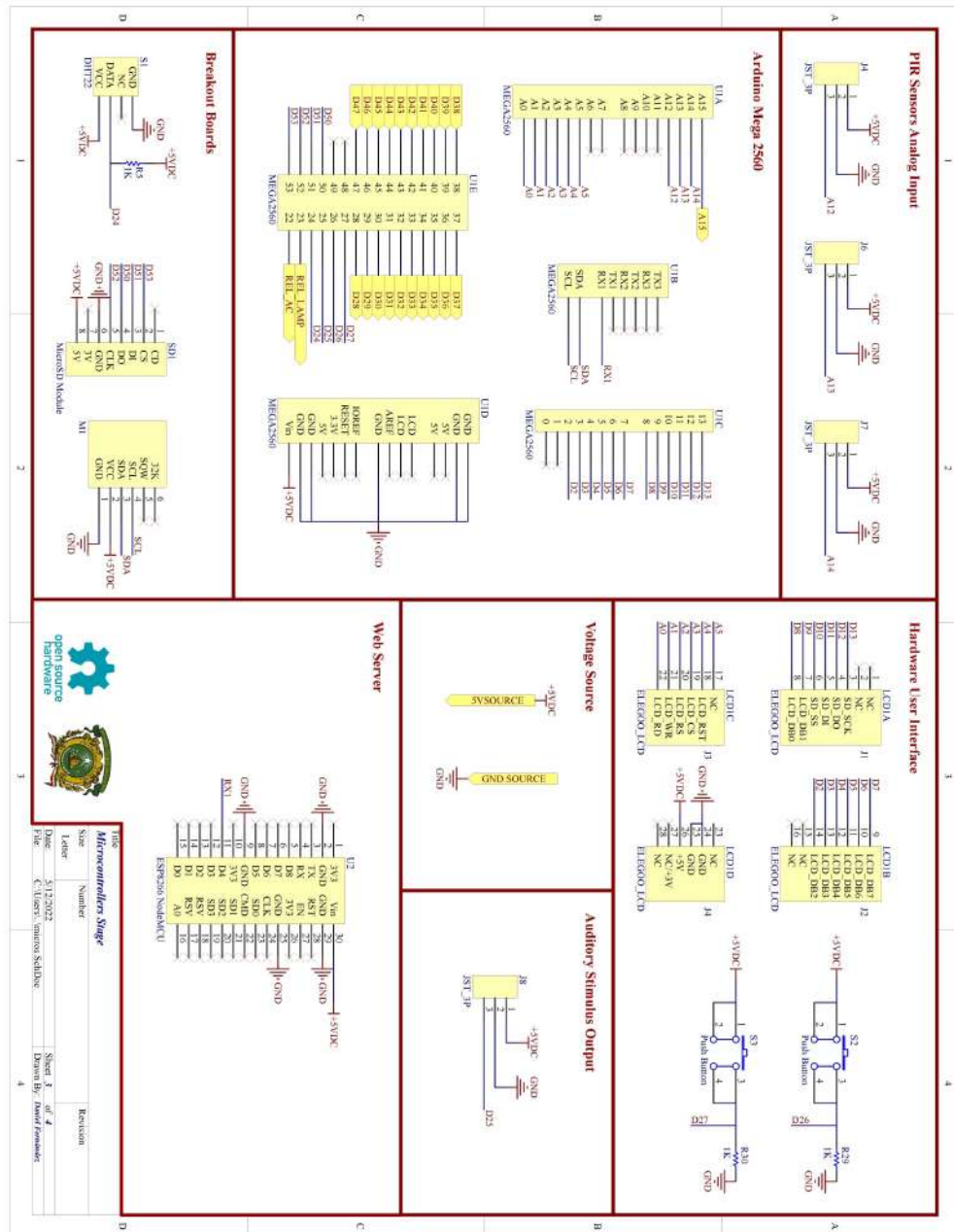
11.1.2. Diagrama Electrónico: Diseño Jerárquico y Conexiones de Varias Hojas



11.1.3. Diagrama Electrónico: Etapa de Potencia y Alimentación



11.1.4. Diagrama Electrónico: Etapa Digital y de Microcontroladores



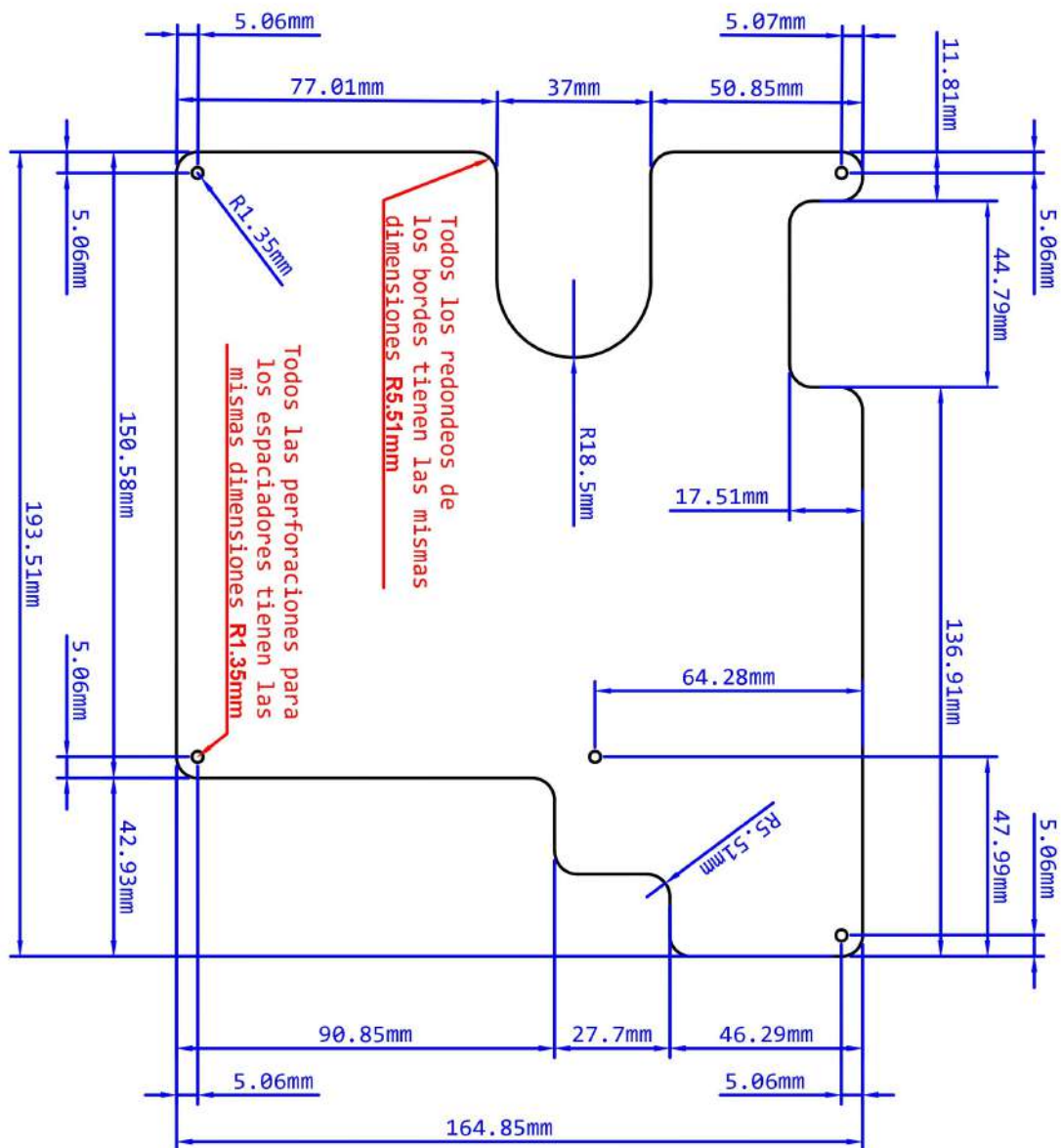
11.2. Apéndice B

Tabla 8: Lista de componentes

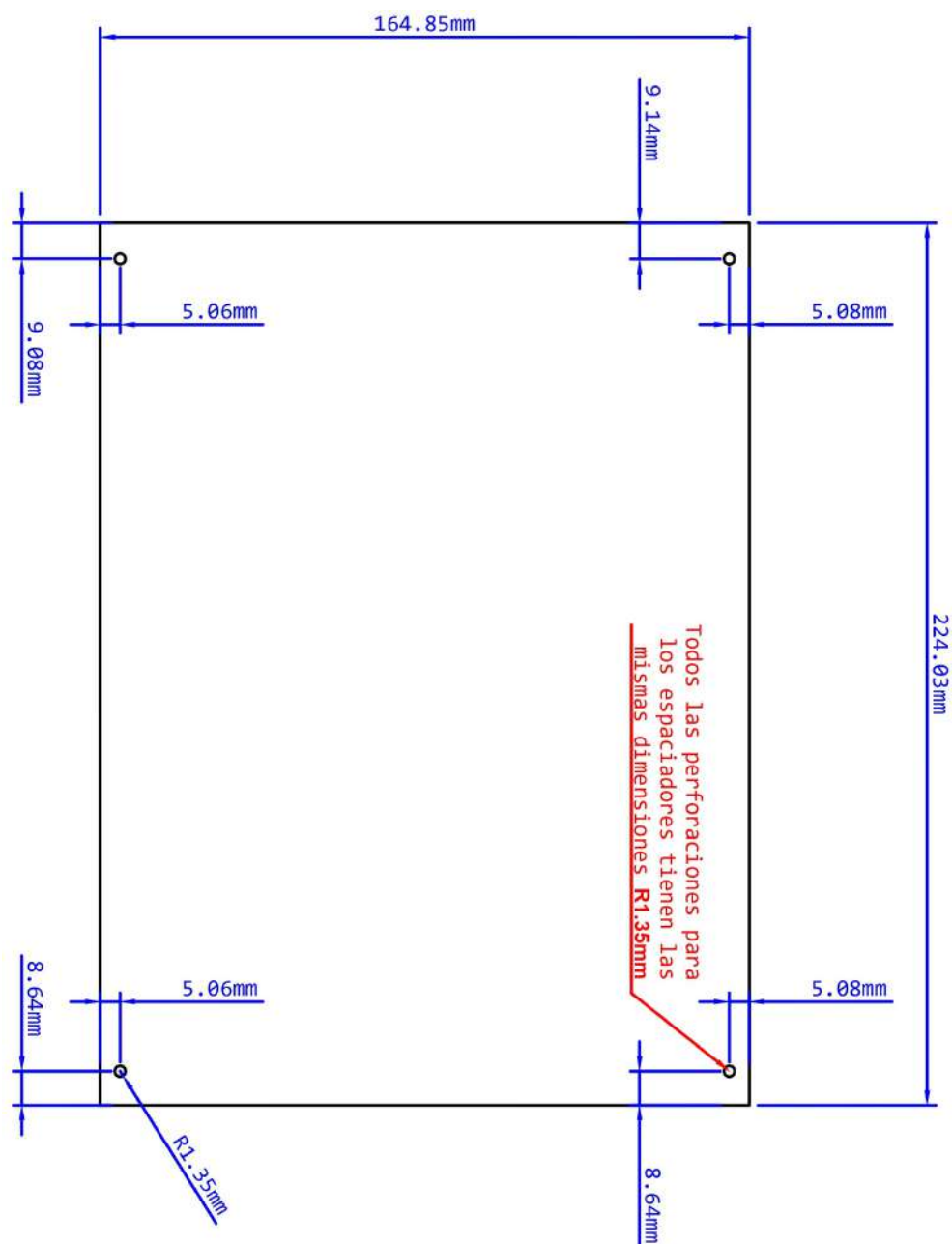
Categoría	Componente	Cant.
Capacitores	United Chemi-Con ESMQ351VSN471MR35S	1
Conectores	Conector macho de ángulo recto de 3 pines 2.54 mm JST-XH	4
Conectores	Conector hembra de 3 pines 2.54 mm JST-XH con cables	4
Conectores	Toma de banana de prueba de ángulo recto de 4 mm	2
Conectores	Plugs de Audio de 3.5mm	1
Diodos	LED ultra brillante de 5 mm	2
Diodos	Diodo rectificador estándar 1N4007	2
Diodos	Comchip Technology KBPC1010W-G	1
Espaciadores	RAF Electronic Hardware M1274-2545-SS	5
Espaciadores	Harwin R25-1002502	20
Espaciadores	Wurth Elektronik 971050154	58
Espaciadores	Wurth Elektronik 970100154	4
Fusibles	Littelfuse 65600001009	1
Fusibles	Littelfuse 0217.050MXP	1
Interruptores	SparkFun COM-08837	1
Interruptores	Toptek SWTA6601-B 6X6MM	2
Módulo	ELEGOO 2.8 Pulgadas TFT Pantalla Táctil	1
Módulo	Módulo RTC DS3231	1
Módulo	MEAN WELL IRM-10-5	1
Módulo	Mini Amplificador PAM8406	1
Módulo	Placa de Desarrollo IC de Tarjeta MicroSD	1
Otros	Bombilla Incandescente E12 de 7.5W	1
Otros	Portalámpara E12 de Porcelana	1
Relés	833H-1C-S-5VDC	2
Relés	TLP240GAF Optoacoplador de Salida MOSFET	20
Resistencias	Bourns PTV09A-4020F-B504	1
Resistencias	Resistencia de 680 Ohm 1/4 Watt 5 %	20
Resistencias	Resistencia de 1k Ohm 1/4 Watt 5 %	6
Resistencias	Resistencia de 100 Ohm 1/4 Watt 5 %	2
Resistencias	Resistencia de 100k Ohm 1/4 Watt 5 %	1
Resistencias	Resistencia de 10W 10k Ohm 5 % de Cemento Cerámico	1
Sensores	Sensor de Temperatura DHT22 (AM2302)	1
Sensores	Sensor PIR HC-SR501	3
Tarjeta	NodeMCU LUA Wifi ESP8266 V2	1
Tarjeta	Arduino MEGA 2560 R3	1
Terminales	Bloques de terminales fijos de 2 posiciones 5.08 mm	13
Transistores	BC547CBU BJT NPN 45V 0.1A	2

11.3. Apéndice C

11.3.1. Tapa Superior del Gabinete Electrónico: Plano CAD y Dimensiones



11.3.2. Tapa Inferior del Gabinete Electrónico: Plano CAD y Dimensiones



11.3.3. Gabinete del Módulo de Audio: Plano CAD y Dimensiones

