

# **Neural Analytics: una herramienta software basada en redes neuronales de procesamiento de EEGs**

Bachelor's Degree in Computer Engineering

## **Final Degree Project**

### **Author:**

Sergio Martínez Aznar

### **Supervisor(s):**

Antonio Molina Picó

### **Academic Year:**

2024/2025



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS  
D'ALCOI

*Para aquellos que una vez soñaron con volar alto, y lo arriesgaron todo.*

# Resumen

Este proyecto presenta el desarrollo de un sistema de control domótico basado en interfaces cerebro-computadora (BCI). El objetivo principal es implementar un sistema no invasivo que permita la integración de señales cerebrales con dispositivos de iluminación inteligente, específicamente bombillas TP-Link Tapo.

El sistema utiliza la diadema Brainbit como dispositivo de adquisición de señales electroencefalográficas (EEG), procesando estas señales mediante una arquitectura de software que combina Deep Learning para procesamiento y una solución desarrollada en Rust para el consumo del modelo e interacción con el sistema de iluminación.

El marco teórico aborda el desarrollo de un modelo de clasificación basado en señales EEG, explorando técnicas de procesamiento de señales y aprendizaje automático para la interpretación precisa de patrones cerebrales. Además, se profundiza en los requisitos técnicos y normativos necesarios para el desarrollo de dispositivos médicos, con especial énfasis en el estándar IEC 62304 para procesos del ciclo de vida del software de dispositivos médicos, y la implementación de sistemas operativos en tiempo real (RTOS) para garantizar la fiabilidad y seguridad del sistema.

La solución propuesta integra tecnologías modernas de procesamiento de señales cerebrales con sistemas de domótica, creando una interfaz natural e intuitiva para el control del entorno doméstico. Este proyecto representa un paso hacia la democratización de las interfaces cerebro-computadora en aplicaciones cotidianas.

**Palabras clave:** Interfaz cerebro-computadora, BCI, Domótica, Aprendizaje profundo, Rust, EEG, RTOS, Certificación médica



# Abstract

This project presents the development of a home automation control system based on brain-computer interfaces (BCI). The main objective is to implement a non-invasive system that enables the integration of brain signals with smart lighting devices, specifically TP-Link Tapo bulbs.

The system uses the Brainbit headband as an electroencephalographic (EEG) signal acquisition device, processing these signals through a software architecture that combines PyTorch for training deep learning models and Rust for the development of the inference engine.

The theoretical framework addresses the development of a classification model based on EEG signals, exploring signal processing and machine learning techniques for accurate interpretation of brain patterns. Additionally, it delves into the technical and regulatory requirements necessary for medical device development, with special emphasis on the IEC 62304 standard for medical device software life cycle processes, and the implementation of real-time operating systems (RTOS) to ensure system reliability and safety.

The proposed solution integrates modern brain signal processing technologies with home automation systems, creating a natural and intuitive interface for controlling the home environment. This project represents a step towards the democratization of brain-computer interfaces in everyday applications.

**Keywords:** Brain-computer interface, BCI, Home automation, Deep learning, Rust, PyTorch, EEG, RTOS, Medical certification



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Índice general</b>	<b>v</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Metodología . . . . .	3
1.3.1. Fase de Investigación . . . . .	3
1.3.2. Fase de Desarrollo . . . . .	3
1.3.3. Fase de Validación . . . . .	3
<b>I Marco Teórico</b>	<b>5</b>
<b>2. Normativa UNE-EN 62304</b>	<b>7</b>
2.1. Objetivo y Alcance . . . . .	7
2.2. Clasificación del Software . . . . .	8
2.3. Cumplimiento y Aplicación durante el proyecto . . . . .	8
<b>3. Regiones implicadas del cerebro</b>	<b>9</b>
3.1. Introducción a las Regiones Cerebrales Funcionales . . . . .	9
3.2. El Lóbulo Temporal y la Memoria Visual . . . . .	10
3.3. El Lóbulo Occipital y la Percepción del Color . . . . .	10
3.4. Integración entre Memoria y Percepción . . . . .	11
3.5. Aplicaciones en Interfaces Cerebro-Computadora . . . . .	11
3.6. Aplicaciones durante este proyecto . . . . .	11
<b>4. Sistemas operativos en Tiempo Real</b>	<b>13</b>
4.1. Taxonomía de Sistemas en Tiempo Real . . . . .	14
4.1.1. Sistemas de Tiempo Real Estricto . . . . .	14
4.1.2. Sistemas de Tiempo Real Flexible . . . . .	15
4.1.3. Consideraciones de Implementación . . . . .	15
4.2. Soluciones Comerciales para Hard Real-Time . . . . .	16
4.2.1. VxWorks (Wind River Systems) . . . . .	16

4.2.2.	QNX Neutrino (BlackBerry)	16
4.2.3.	Zephyr RTOS (Linux Foundation)	17
4.3.	Soluciones Comerciales para Soft Real-Time	18
4.3.1.	Wind River Linux (Wind River Systems)	18
4.3.2.	Poky Linux (Proyecto Yocto)	18
4.4.	Elección de RTOS para el Proyecto	19
4.4.1.	Requisitos Temporales del Sistema	19
4.4.2.	Consideraciones Técnicas	19
4.4.3.	Aspectos Regulatorios	19
<b>5.</b>	<b>Modelos de Deep Learning</b>	<b>21</b>
5.1.	Conceptos Fundamentales	21
5.1.1.	Ventanas Temporales	21
5.1.2.	One-Hot Encoding	21
5.2.	Arquitectura del Modelo	22
5.2.1.	Función de Activación ReLU	22
5.2.2.	LSTM (Long Short-Term Memory)	23
5.2.3.	Función Softmax	24
5.3.	Evaluación del Modelo	24
5.3.1.	Métricas de Evaluación	24
<b>II</b>	<b>Revisión Hardware &amp; Software</b>	<b>25</b>
<b>6.</b>	<b>BrainBit Headset</b>	<b>27</b>
6.1.	Introducción	27
6.2.	Características Técnicas del Dispositivo	27
6.3.	Relevancia del Lóbulo Occipital en el Procesamiento Visual	27
6.4.	Metodologías para la Adquisición y Procesamiento	28
6.4.1.	Captación de Señales	28
6.4.2.	Acondicionamiento de Señales	28
6.4.3.	Análisis mediante Aprendizaje Profundo	28
6.5.	Campos de Aplicación	28
6.6.	Aplicación en este proyecto	28
<b>7.</b>	<b>Raspberry Pi 4 Model B (8GB)</b>	<b>29</b>
7.1.	Introducción	29
7.2.	Especificaciones Técnicas	29
7.2.1.	Procesador y Memoria	29
7.2.2.	Requerimientos de Energía	29
7.2.3.	Interfaces y Conectividad	30
7.2.4.	Consideraciones Térmicas	30
7.3.	Elección de este dispositivo para el Proyecto	30
<b>III</b>	<b>Marco Practico</b>	<b>31</b>
<b>8.</b>	<b>Análisis Práctico</b>	<b>33</b>
8.1.	Objetivos Especificos	33



8.1.1. Realizados . . . . .	33
8.1.2. Deseados (Futuras Mejoras) . . . . .	33
8.2. Requistios funcionales y no funcionales . . . . .	33
8.2.1. Requisitos Funcionales . . . . .	33
8.2.2. Requisitos No Funcionales . . . . .	33
8.3. Bibliotecas Usadas . . . . .	33
<b>9. Planificación Temporal</b>	<b>35</b>
<b>10. Entrenamiento del modelo</b>	<b>37</b>
10.1. Descripción de la arquitectura . . . . .	37
10.2. Preprocesamiento de los datos . . . . .	37
10.3. Resultados del entrenamiento . . . . .	37
<b>11. Implementación del Core</b>	<b>39</b>
11.1. Implementación del modelo . . . . .	39
11.2. Consumo del SDK de BrainFlow . . . . .	39
11.3. Interconexión con el sistema domótico . . . . .	39
11.4. Implementación de la interfaz gráfica . . . . .	39
<b>12. Validación del Prototipo</b>	<b>41</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>43</b>
<b>Acknowledgments</b>	<b>45</b>



# Índice de figuras

4.1.	Ecuación de sistemas de tiempo real estricto. . . . .	14
4.2.	Ecuación de sistemas de tiempo real flexible. . . . .	15
5.1.	Ejemplo de One-Hot Encoding para tres colores. . . . .	21
5.2.	Ecuación de la función ReLU. . . . .	22
5.3.	Ecuación de la función Softmax. . . . .	24



# Capítulo 1

## Introducción

El presente trabajo aborda el diseño y desarrollo de un innovador sistema de automatización del hogar que integra tecnología de interfaz cerebro-computadora (BCI) con sistemas de iluminación inteligentes. La finalidad principal consiste en desarrollar una solución no invasiva que facilite el control del entorno doméstico mediante la lectura e interpretación de ondas cerebrales, empleando dispositivos de iluminación TP-Link Tapo como elementos de control.

La implementación de este proyecto se fundamenta en dos pilares: el procesamiento de señales electroencefalográficas (EEG) mediante aprendizaje profundo y el cumplimiento de la normativa UNE-EN 62304 para dispositivos médicos. Para garantizar la respuesta en tiempo real del sistema, se utiliza Wind River Linux como sistema operativo base.

### 1.1. Motivación

Desde que inicié mi formación en ingeniería, siempre he sentido una profunda fascinación por las interfaces cerebro-computadora (BCI) y sus posibles aplicaciones. Este proyecto representa una perfecta síntesis de mis pasiones e inquietudes: la tecnología, los sistemas operativos en tiempo real, la medicina y la innovación. La oportunidad de trabajar en un sistema que combine el procesamiento de señales cerebrales con el control domótico me permite explorar un campo que considero revolucionario para la interacción persona-máquina.

La decisión de trabajar con actuadores domóticos comunes, específicamente bombillas inteligentes, no es casual. Permite demostrar de manera sencilla y visual el funcionamiento del sistema BCI, haciendo tangible una tecnología que a menudo puede parecer abstracta o inalcanzable. Además, este enfoque práctico facilita la comprensión del sistema y su potencial impacto en la vida cotidiana.

El aspecto normativo del proyecto, aunque técnicamente desafiante, representa para mí una oportunidad única de entender cómo llevar una idea innovadora desde el concepto hasta un producto viable en el mercado médico. El proceso de cumplir con la normativa UNE-EN 62304, implementar un sistema en tiempo real y desarrollar una metodología robusta, lejos de ser una limitación, ha enriquecido significativamente mi comprensión de lo que significa desarrollar tecnología médica responsable y segura.

## 1.2. Objetivos

Este proyecto tiene como finalidad principal el desarrollo de un sistema de control domótico basado en interfaces cerebro-computadora, buscando hacer más accesible esta tecnología en entornos cotidianos.

Para alcanzar esta meta, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- **Cumplimiento del estándar UNE-EN 62304:** Crear una solución que cumpla con la normativa UNE-EN 62304, garantizando la seguridad y fiabilidad del software médico mediante una metodología de desarrollo rigurosa y documentada.
- **Implementar un clasificador de señales EEG:** Implementar un modelo de aprendizaje profundo para la clasificación de señales EEG, utilizando PyTorch como framework de desarrollo y centrándose en la detección de patrones asociados a la visualización de colores.
- **Desarrollar un sistema de control BCI:** Crear un sistema que permita el control de dispositivos de iluminación inteligente mediante señales EEG, utilizando la diadema Brainbit como dispositivo de adquisición de señales.
- **Generar una imagen para la RPi4:** Generar una imagen de sistema operativo personalizada basada en Wind River Linux, asegurando un entorno de ejecución con garantías de tiempo real blando para el procesamiento de señales EEG.

Estos objetivos se han definido considerando tanto los aspectos técnicos como normativos del proyecto, buscando un equilibrio entre la innovación tecnológica y la viabilidad práctica en entornos reales.

## 1.3. Metodología

El desarrollo del proyecto sigue una metodología estructurada en varias fases:

### 1.3.1. Fase de Investigación

- Estudio de la literatura sobre procesamiento de señales EEG
- Análisis de requisitos normativos para dispositivos médicos
- Evaluación de tecnologías y frameworks disponibles

### 1.3.2. Fase de Desarrollo

- Implementación del modelo de clasificación en PyTorch
- Desarrollo del motor de inferencia en Rust
- Integración con el SDK de BrainFlow
- Creación de la imagen personalizada de Wind River Linux

### 1.3.3. Fase de Validación

- Pruebas de rendimiento y fiabilidad
- Verificación del cumplimiento normativo
- Evaluación de la usabilidad del sistema

La vertiente práctica del proyecto comprende una descripción exhaustiva del proceso de desarrollo, incluyendo el entrenamiento del modelo de aprendizaje profundo, su incorporación al sistema global y la creación de una imagen personalizada para la Raspberry Pi 4.





# Parte I

## Marco Teórico



# Capítulo 2

## Normativa UNE-EN 62304

La norma **UNE-EN 62304:2007/A1:2016** Asociación Española de Normalización (2016) es la versión española de la norma **IEC 62304:2006/A1:2015**, adoptada como norma europea EN 62304:2006/A1:2015. Esta normativa establece los requisitos para los **procesos del ciclo de vida del software en dispositivos médicos**, asegurando su desarrollo, mantenimiento y gestión de riesgos de acuerdo con estándares internacionales.

### 2.1. Objetivo y Alcance

El propósito de la UNE-EN 62304 Asociación Española de Normalización (2016) es definir un marco normativo para la **gestión del ciclo de vida del software** en dispositivos médicos, asegurando su seguridad y eficacia.

Esta norma se aplica a:

- **Software que es un dispositivo médico en sí mismo.**
- **Software embebido en dispositivos médicos.**
- **Software utilizado en entornos médicos para diagnóstico, monitoreo o tratamiento.**

El estándar establece **procesos y actividades** que los fabricantes deben seguir, incluyendo:

- Planificación del desarrollo del software.
- Análisis de requisitos y arquitectura del software.
- Implementación, integración, pruebas y verificación.
- Gestión del mantenimiento y resolución de problemas.
- Gestión del riesgo asociado al software.
- Gestión de la configuración y cambios.

## 2.2. Clasificación del Software

La norma clasifica el software en **tres niveles de seguridad** según el riesgo que pueda representar para el paciente o el operador:

- **Clase A:** El software no puede causar daño en ninguna circunstancia.
- **Clase B:** El software puede contribuir a una situación peligrosa, pero el daño potencial es **no serio**.
- **Clase C:** El software puede contribuir a una situación peligrosa con **riesgo de daño serio o muerte**.

## 2.3. Cumplimiento y Aplicación durante el proyecto

Dado el carácter estricto, y la propia necesidad de garantizar el cumplimiento de la UNE-EN 62304 Asociación Española de Normalización (2016) en este trabajo, se seguirá un enfoque basado en la **gestión del ciclo de vida del software** y la evaluación de riesgos. Se adoptarán buenas prácticas de ingeniería de software y se documentarán las actividades necesarias para cumplir con los requisitos de seguridad y calidad establecidos por la normativa.

En este proyecto, utilizaremos un **modelo de desarrollo iterativo e incremental** inspirado en metodologías ágiles como Scrum, adaptado a las necesidades específicas del desarrollo de software médico. Este enfoque nos permitirá una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a los cambios, así como una entrega continua de valor al cliente.

Considerando que el sistema únicamente controla el encendido y apagado de una bombilla inteligente TP-Link Tapo de manera remota, hemos clasificado el software como de **Clase A**. Esta clasificación se justifica porque el software no puede causar daño al usuario en ninguna circunstancia, ya que:

- La diadema BrainBit es un dispositivo no invasivo de lectura pasiva
- El control se realiza sobre una bombilla doméstica de baja tensión
- No hay interacción directa con sistemas críticos o vitales

A pesar de esta clasificación de bajo riesgo, mantendremos buenas prácticas de desarrollo y documentación para asegurar la calidad del software.

Dado que esta normativa es un **requisito esencial** para el desarrollo de software en el mercado sanitario español y europeo, su correcta implementación garantizará la viabilidad del producto en entornos clínicos y su aceptación por parte de los organismos reguladores.

# Capítulo 3

## Regiones implicadas del cerebro

### 3.1. Introducción a las Regiones Cerebrales Funcionales

El cerebro humano es un sistema altamente organizado en el que diferentes regiones trabajan de manera especializada pero interconectada para procesar la información y generar respuestas conductuales adecuadas. Como indican en su libro "Principios de Neurociencia" los autores Kandel, Jessell y Schwartz (2001), el estudio de la neurociencia ha demostrado que la división funcional del cerebro permite analizar la forma en que los procesos perceptivos, cognitivos y emocionales emergen de la actividad neuronal distribuida. En este proyecto, nos enfocamos en dos regiones clave para la percepción y la memoria del color: el lóbulo occipital y el lóbulo temporal.

Utilizando un sistema BCI basado en EEG, empleamos electrodos en ubicaciones específicas del sistema internacional 10-20: O1 y O2 en el lóbulo occipital, responsables del procesamiento primario de la información visual, y T3 y T4 en el lóbulo temporal, donde la información visual se asocia con memorias previas y respuestas emocionales.

Gracias a esta organización funcional, podemos estudiar la relación entre percepción e imaginación del color, explorando su impacto en la memoria y la experiencia subjetiva.

## 3.2. El Lóbulo Temporal y la Memoria Visual

El lóbulo temporal es crucial en la memoria visual y la asociación semántica de colores. Los electrodos T3 y T4 captan la actividad relacionada con:

- **Hipocampo:** Responsable de la consolidación de memorias visuales y asociaciones cromáticas.
- **Corteza temporal medial:** Procesa la identificación y categoría de los colores.
- **Amígdala:** Relaciona el color con respuestas emocionales, modulando el impacto afectivo de los colores percibidos o imaginados.
- **Corteza entorrinal:** Conecta el hipocampo con otras áreas corticales, permitiendo que las asociaciones cromáticas se integren en experiencias más complejas.

Cuando una persona recuerda un color, T3 y T4 reflejan la activación de estos circuitos, permitiendo analizar la relación entre percepción visual y memoria. Estudios como los de Squire y Zola-Morgan (1991) han demostrado que lesiones en el lóbulo temporal pueden afectar la capacidad de recuperar memorias visuales, lo que refuerza su papel en el almacenamiento de información sensorial.

## 3.3. El Lóbulo Occipital y la Percepción del Color

El lóbulo occipital es la principal región del cerebro para el procesamiento de la información visual. Los electrodos O1 y O2 capturan la actividad en:

- **Corteza visual primaria (V1):** Primer procesamiento del color y detección de longitudes de onda.<sup>1</sup>
- **V4 (corteza visual asociativa):** Especializada en la interpretación y categorización de colores, estableciendo una conexión funcional con las áreas temporales para asignar significados semánticos.

Estudios como los de Brouwer y Heeger (2013) han demostrado que la actividad en V4 puede ser utilizada para clasificar diferentes colores percibidos o imaginados, lo que refuerza la validez de nuestros electrodos O1 y O2 para el análisis de patrones cromáticos en EEG.

---

<sup>1</sup>Es importante distinguir entre O1/O2, que son las *posiciones de los electrodos* según el sistema internacional 10-20, y V1/V4, que son *áreas funcionales del córtex visual* (designaciones de Brodmann) cuya actividad es registrada por dichos electrodos.

### 3.4. Integración entre Memoria y Percepción

El procesamiento del color en el cerebro, simplificándolo al absurdo, sigue un flujo distribuido:

1. O1/O2 detectan y analizan las características del color percibido o imaginado.
2. La información es enviada a T3/T4 para su comparación con recuerdos previos y asociaciones emocionales.
3. Se generan asociaciones semánticas y afectivas, determinando la experiencia subjetiva del color.

Estudios como los de Rissman y Wagner (2012) han mostrado que patrones de activación en el lóbulo temporal pueden predecir si un individuo reconoce un color previamente visto, lo que refuerza la idea de que los recuerdos cromáticos tienen una representación neural clara.

### 3.5. Aplicaciones en Interfaces Cerebro-Computadora

La integración de la percepción y la memoria del color en un sistema BCI tiene varias aplicaciones potenciales:

- Diferenciar entre percepción real e imaginada de un color.
- Implementar sistemas BCI basados en selección cromática.
- Explorar la relación entre color, memoria y emociones para aplicaciones en neurotecnología.

De este modo, podemos explorar mediante una interfaz cerebro-computadora cómo la percepción y la memoria del color se integran en la experiencia subjetiva, permitiendo así que pueda ser interpretado por un computador y que este pueda realizar acciones en función de la información recibida.

### 3.6. Aplicaciones durante este proyecto

Los electrodos O1, O2, T3 y T4 capturan información clave sobre la percepción y la memoria del color. Su combinación permite analizar la reconstrucción mental de colores y su impacto en la experiencia subjetiva, formando la base de nuestro sistema BCI. La inclusión de referencias a trabajos clave refuerza la validez del enfoque adoptado en este estudio.





# Capítulo 4

## Sistemas operativos en Tiempo Real

Los sistemas operativos en tiempo real (RTOS) Siewert and Pratt (2016) constituyen una rama especializada del software orientada a garantizar la previsibilidad temporal en entornos que requieren respuestas precisas. A diferencia de los sistemas operativos convencionales, estos sistemas priorizan la **predictibilidad temporal** sobre la velocidad de procesamiento, asegurando que cada operación se ejecute dentro de intervalos temporales específicos.

El concepto de computación en tiempo real emerge de la necesidad de procesar y responder a eventos del mundo físico con restricciones temporales bien definidas. En un RTOS, la corrección del sistema no solo depende de la exactitud lógica de los resultados, sino también del momento en que estos se producen. Esta dualidad en los requisitos (*corrección lógica + corrección temporal*) distingue fundamentalmente a los RTOS de los sistemas operativos de propósito general.

La arquitectura de un RTOS se caracteriza por varios componentes esenciales:

- **Planificador determinista:** Garantiza que las tareas críticas se ejecuten en momentos predecibles
- **Gestión de interrupciones:** Manejo prioritario de eventos externos con latencias acotadas
- **Gestión de memoria:** Esquemas de asignación y liberación que evitan indeterminismos temporales

En el ámbito de los sistemas embebidos, principal campo de aplicación de estos sistemas, el RTOS funciona como intermediario entre los componentes físicos y las operaciones de control. Un caso ilustrativo son los sistemas de seguridad en vehículos, donde cualquier retraso, incluso de microsegundos, podría resultar crítico.

En algunos casos, estos requisitos de fiabilidad y predictibilidad temporal se extienden a sistemas de propósito general, especialmente en aplicaciones médicas y de consumo que demandan garantías temporales.

Un ejemplo paradigmático son los dispositivos médicos implantables, donde la fiabilidad y predictibilidad temporal son requisitos fundamentales para garantizar la seguridad del paciente. Esta expansión ha llevado al desarrollo de estrictos marcos regulatorios y procesos de certificación específicos para cada sector de aplicación.

## 4.1. Taxonomía de Sistemas en Tiempo Real

La clasificación de los sistemas operativos en tiempo real se fundamenta principalmente en la criticidad de sus restricciones temporales. Esta taxonomía, establecida inicialmente por Liu y Layland en 1973 Siewert and Pratt (2016), ha evolucionado para adaptarse a las necesidades modernas de la computación en tiempo real. La distinción fundamental se establece entre sistemas estrictos (*hard real-time*) y flexibles (*soft real-time*), aunque algunos autores reconocen una categoría intermedia denominada *firm real-time*.

### 4.1.1. Sistemas de Tiempo Real Estricto

Los sistemas de tiempo real estricto (**hard real-time**) se caracterizan por la intolerancia absoluta a desviaciones temporales. En estos sistemas, el incumplimiento de un plazo temporal se considera un fallo catastrófico del sistema. La expresión matemática que define su comportamiento es:

$$\forall t \in T : R(t) \leq D(t) \quad (4.1)$$

Figura 4.1: Ecuación de sistemas de tiempo real estricto.

donde  $R(t)$  representa el tiempo de respuesta y  $D(t)$  el plazo temporal máximo permitido.

Ejemplos paradigmáticos incluyen:

- **Sistemas de control nuclear:** Donde los tiempos de respuesta deben ser absolutamente predecibles para garantizar la seguridad
- **Mecanismos de frenado electrónico:** El ABS debe responder en microsegundos para prevenir accidentes
- **Sistemas quirúrgicos robotizados:** Requieren sincronización precisa para operaciones de alta precisión

Su implementación requiere sistemas de planificación **preemptivos** con prioridades estáticas, donde el tiempo máximo de ejecución (WCET) debe ser predecible y verificable. La planificación típicamente se basa en el algoritmo Rate Monotonic (RM) o Earliest Deadline First (EDF).

### 4.1.2. Sistemas de Tiempo Real Flexible

Los sistemas de tiempo real flexible (**soft real-time**) toleran cierta variabilidad en el cumplimiento de plazos temporales, operando bajo un modelo probabilístico donde:

$$P(R(t) \leq D(t)) \geq p_{min} \quad (4.2)$$

Figura 4.2: Ecuación de sistemas de tiempo real flexible.

siendo  $p_{min}$  el nivel mínimo aceptable de cumplimiento temporal.

Ejemplos representativos incluyen:

- **Plataformas de streaming multimedia:** Donde ocasionales pérdidas de frames son aceptables
- **Redes de monitorización industrial:** Con tolerancia a retrasos ocasionales en la actualización de datos
- **Sistemas de trading automatizado:** Donde el rendimiento promedio es más importante que garantías absolutas

Estos sistemas utilizan habitualmente planificadores basados en **tiempo compartido** con prioridades dinámicas, priorizando la optimización del rendimiento promedio sobre las garantías temporales absolutas. Las políticas de planificación suelen incluir variantes de Round Robin y planificación por prioridades dinámicas.

### 4.1.3. Consideraciones de Implementación

La elección entre implementaciones estrictas y flexibles debe considerar:

- **Análisis de Riesgos:** Evaluación de consecuencias por fallos temporales
- **Recursos Disponibles:** Capacidad de procesamiento y memoria
- **Costes:** Balance entre garantías temporales y complejidad del sistema
- **Certificación:** Requisitos regulatorios del dominio de aplicación

## 4.2. Soluciones Comerciales para Hard Real-Time

### 4.2.1. VxWorks (Wind River Systems)

VxWorks, desarrollado por Wind River Systems, representa el estándar industrial en sistemas embebidos críticos, especialmente en sectores como la aviónica, espacial y médico. Sus características principales incluyen:

#### Certificaciones y Cumplimiento Normativo

- DO-178C Level A para sistemas aeroespaciales
- IEC 62304 para dispositivos médicos
- ISO 26262 ASIL D para automoción

#### Características Técnicas

- **Kernel:** Microkernel determinista con tiempos de interrupción  $\leq 50$  ns
- **Memoria:** MMU con protección y aislamiento de espacios de memoria
- **Scheduling:** Planificador con 256 niveles de prioridad y herencia de prioridad
- **IPC:** Mecanismos de comunicación con latencia determinista
- **Multiprocesamiento:** Soporte para SMP y AMP con aislamiento de cores

### 4.2.2. QNX Neutrino (BlackBerry)

QNX Neutrino, adquirido por BlackBerry, destaca por su arquitectura de microkernel distribuido y su alto nivel de fiabilidad:

#### Arquitectura

- **Microkernel:** Núcleo de menos de 100KB
- **Servicios:** Arquitectura modular con servicios en espacio de usuario
- **IPC:** Sistema de mensajería síncrona y asíncrona con copy-on-write
- **Recuperación:** Capacidad de reinicio de componentes sin afectar al sistema

#### Características Avanzadas

- **Tiempo Real:** Garantías temporales con latencias  $\leq 100 \mu s$
- **Seguridad:** Modelo de seguridad adaptativo con ASLR
- **Certificaciones:** IEC 61508 SIL3, IEC 62304 Clase C

### 4.2.3. Zephyr RTOS (Linux Foundation)

Zephyr representa la alternativa open-source para sistemas embebidos críticos:

#### Diseño y Arquitectura

- **Kernel:** Monolítico o microkernel configurable
- **Footprint:** Desde 8KB hasta configuraciones completas de 512KB
- **Scheduling:** Planificador configurable con hasta 32 niveles de prioridad
- **Certificación:** Proceso de certificación para IEC 61508 SIL 3/4

#### Características Destacadas

- **Drivers:** Más de 350 drivers para diferentes periféricos
- **Networking:** Soporte nativo para protocolos IoT (BLE, Thread, LoRaWAN)
- **Seguridad:** Subsistema de seguridad con aislamiento de memoria
- **Desarrollo:** Herramientas de desarrollo y depuración avanzadas

## 4.3. Soluciones Comerciales para Soft Real-Time

### 4.3.1. Wind River Linux (Wind River Systems)

Wind River Linux representa una solución empresarial certificada, basada en el Proyecto Yocto, específicamente diseñada para el desarrollo de sistemas embebidos que requieren garantías temporales flexibles:

#### Características Principales

- **Base:** Kernel Linux 5.10 LTS con parche PREEMPT\_RT
- **Certificaciones:** ISO 9001:2015 y precertificación IEC 62304
- **Seguridad:** Monitorización continua de CVEs y mitigación
- **Cumplimiento:** Documentación SBOM y Open Chain 2.1

#### Capacidades Industriales

- **Soporte:** Mantenimiento garantizado de 5 años con extensión LTS
- **Actualizaciones:** Sistema OTA seguro mediante OSTree
- **Validación:** Más de 60.000 casos de prueba automatizados
- **Servicios:** Soporte profesional y consultoría disponible

### 4.3.2. Poky Linux (Proyecto Yocto)

Poky constituye la distribución de referencia del Proyecto Yocto, proporcionando una base para el desarrollo de sistemas Linux embebidos con capacidades de tiempo real flexible:

#### Características Técnicas

- **Kernel:** Linux con soporte opcional para PREEMPT\_RT
- **Tiempo Real:** Latencias configurables según necesidades
- **Optimización:** Control fino sobre el tamaño y rendimiento
- **Personalización:** Capacidad de eliminar componentes innecesarios

#### Consideraciones de Desarrollo

- **Mantenimiento:** Actualización manual de parches de seguridad
- **Soporte:** Basado en la comunidad, sin garantías comerciales
- **Certificación:** Requiere proceso de certificación propio
- **Validación:** Necesidad de desarrollar pruebas específicas

## 4.4. Elección de RTOS para el Proyecto

La elección de Wind River Linux como sistema operativo para este proyecto se fundamenta en varios factores críticos:

### 4.4.1. Requisitos Temporales del Sistema

El proyecto requiere un sistema de tiempo real flexible (**soft real-time**), ya que:

- La detección de patrones cerebrales para la identificación de colores (rojo/verde) no requiere garantías temporales estrictas
- Las consecuencias de un retraso en la respuesta no comprometen la seguridad del usuario
- El control de iluminación mediante TP-Link Tapo tolera latencias moderadas

### 4.4.2. Consideraciones Técnicas

Wind River Linux ofrece ventajas significativas para nuestro caso de uso:

- **Compatibilidad:** Garantiza el funcionamiento correcto del SDK de Brainflow
- **PREEMPT\_RT:** El parche de tiempo real proporciona las garantías temporales necesarias
- **Actualizaciones:** Sistema OTA que facilita el mantenimiento del software

### 4.4.3. Aspectos Regulatorios

La precertificación IEC 62304 de Wind River Linux resulta crucial dado que:

- Reduce significativamente el esfuerzo de certificación del producto final
- Proporciona documentación regulatoria necesaria para el sector médico
- Garantiza el cumplimiento de estándares de seguridad y calidad

Esta combinación de factores hace que Wind River Linux sea la opción más adecuada para nuestro proyecto, proporcionando un equilibrio óptimo entre rendimiento, fiabilidad y cumplimiento normativo.





# Capítulo 5

## Modelos de Deep Learning

A través de este capítulo se describen los modelos de Deep Learning Raschka et al. (2022) utilizados en el proyecto, así como los conceptos fundamentales y la arquitectura de cada uno de ellos. Además, se detallan las métricas de evaluación y la validación cruzada implementada para evaluar el rendimiento de los modelos.

Esto nos permitirá comprender cómo se han diseñado y entrenado los modelos para clasificar señales EEG en tiempo real, y cómo se han evaluado para garantizar su eficacia y fiabilidad.

### 5.1. Conceptos Fundamentales

#### 5.1.1. Ventanas Temporales

Las ventanas temporales en el procesamiento de señales EEG representan segmentos discretos de tiempo durante los cuales se recopilan datos. En nuestro caso, estas ventanas capturan patrones de actividad cerebral asociados con el pensamiento de diferentes colores. La longitud de la ventana temporal es crucial ya que debe ser lo suficientemente larga para capturar los patrones relevantes, pero lo suficientemente corta para permitir una clasificación en tiempo real.

#### 5.1.2. One-Hot Encoding

El One-Hot Encoding Raschka et al. (2022) es una técnica de preprocesamiento que utilizamos para transformar las etiquetas categóricas (colores) en vectores binarios. Por ejemplo, para tres colores:

Color	Vector One-Hot
Rojo	[1, 0, 0]
Verde	[0, 1, 0]
Azul	[0, 0, 1]

Figura 5.1: Ejemplo de One-Hot Encoding para tres colores.

Esta técnica es crucial cuando trabajamos con datos categóricos que no tienen una relación ordinal entre sí. A diferencia de la codificación de etiquetas ordinales, donde asignamos un

valor numérico a cada categoría basándonos en un orden predefinido, One-Hot Encoding crea una columna nueva para cada categoría posible.

Por ejemplo, si tuviéramos una columna de color con las opciones rojo, verde, azul, One-Hot Encoding transformaría esta columna en tres columnas nuevas: rojo, verde, azul. Cada fila tendría un 1 en la columna correspondiente a su color y 0 en las demás.

Esta representación es especialmente útil para algoritmos de machine learning, ya que evita que el modelo interprete erróneamente una relación ordinal entre las categorías. En nuestro caso, nos aseguramos de que el modelo no asuma que un color es "mayor" que otro.

Es importante tener en cuenta que One-Hot Encoding puede aumentar la dimensionalidad de los datos, especialmente si hay muchas categorías posibles. Sin embargo, en nuestro caso, el número de colores es limitado, por lo que este aumento no representa un problema significativo.

## 5.2. Arquitectura del Modelo

### 5.2.1. Función de Activación ReLU

La función ReLU (Rectified Linear Unit) es fundamental en nuestro modelo por sus características:

$$f(x) = \max(0, x) \quad (5.1)$$

Figura 5.2: Ecuación de la función ReLU.

ReLU es una función de activación no lineal que resuelve el problema del desvanecimiento del gradiente presente en otras funciones de activación como tanh o sigmoide. Este problema ocurre cuando, por ejemplo, para valores de entrada grandes ( $z_1 = 20$  y  $z_2 = 25$ ), las funciones tanh y sigmoide producen salidas prácticamente idénticas ( $\sigma(z_1) \approx \sigma(z_2) \approx 1,0$ ) debido a su comportamiento asintótico.

Las principales ventajas de ReLU son:

- **Gradiente Constante:** Para valores positivos de entrada, la derivada es siempre 1, lo que evita el problema del desvanecimiento del gradiente.
- **Computacionalmente Eficiente:** Su implementación es simple y rápida, ya que solo requiere una comparación con cero.
- **No Linealidad:** A pesar de su simplicidad, mantiene la capacidad de aprender funciones complejas.
- **Sparse Activation:** Produce activaciones dispersas, ya que cualquier entrada negativa se convierte en cero.

Esta función ayuda a introducir no-linealidad en el modelo mientras mantiene gradientes estables durante el entrenamiento, haciéndola especialmente adecuada para redes neuronales profundas.

### 5.2.2. LSTM (Long Short-Term Memory)

Las LSTM fueron diseñadas para superar el problema del desvanecimiento del gradiente, que es común en las redes neuronales recurrentes (RNN) estándar. Este problema ocurre debido a la multiplicación repetida de los gradientes durante la retropropagación a través del tiempo (BPTT), lo que puede hacer que los gradientes se vuelvan extremadamente pequeños (desvanecimiento) o extremadamente grandes (explosión).

Para entender mejor este problema, consideremos una RNN con solo una unidad oculta. La derivada de la función de pérdida con respecto a la entrada neta tiene un factor multiplicativo que puede volverse muy pequeño o muy grande dependiendo del valor del peso recurrente. Si el peso recurrente es menor que 1, el gradiente se desvanece; si es mayor que 1, el gradiente explota.

Las LSTM abordan este problema mediante el uso de celdas de memoria que pueden mantener información durante largos períodos. Cada celda de memoria tiene una estructura interna que incluye tres tipos de puertas: la puerta de olvido, la puerta de entrada y la puerta de salida.

- **Puerta de Olvido (Forget Gate):** Decide qué información descartar de la celda de memoria. Se calcula como:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (5.2)$$

- **Puerta de Entrada (Input Gate):** Decide qué nueva información almacenar en la celda de memoria. Se calcula como:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (5.3)$$

- **Valor Candidato (Candidate Value):** Representa la nueva información que se puede agregar a la celda de memoria. Se calcula como:

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (5.4)$$

- **Puerta de Salida (Output Gate):** Decide qué parte de la celda de memoria se utilizará para calcular la salida. Se calcula como:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (5.5)$$

La celda de memoria se actualiza de la siguiente manera:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (5.6)$$

Y la salida de la celda LSTM se calcula como:

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \quad (5.7)$$

Esta estructura permite a las LSTM mantener gradientes estables durante el entrenamiento, lo que las hace especialmente adecuadas para modelar dependencias a largo plazo en secuencias de datos.

### 5.2.3. Función Softmax

La función Softmax es una forma suavizada de la función argmax; en lugar de dar un único índice de clase, proporciona la probabilidad de cada clase. Esto permite calcular probabilidades significativas de clase en configuraciones multiclase (regresión logística multinomial).

En Softmax, la probabilidad de que una muestra con entrada neta  $z$  pertenezca a la clase  $i$  se puede calcular con un término de normalización en el denominador, que es la suma de las funciones lineales ponderadas exponencialmente:

$$p(z) = \sigma(z) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^M e^{z_j}} \quad (5.8)$$

Figura 5.3: Ecuación de la función Softmax.

Las probabilidades de clase predichas ahora suman 1, como se esperaría. También es notable que la etiqueta de clase predicha es la misma que cuando aplicamos la función argmax a la salida logística.

Podemos pensar en el resultado de la función Softmax como una salida normalizada que es útil para obtener predicciones significativas de pertenencia a clases en configuraciones multiclase. Por lo tanto, cuando construimos un modelo de clasificación multiclase, podemos usar la función Softmax para estimar las probabilidades de pertenencia a cada clase para un lote de ejemplos de entrada.

## 5.3. Evaluación del Modelo

### 5.3.1. Métricas de Evaluación

Para evaluar el rendimiento del modelo utilizamos:

- **Accuracy:** Proporción de predicciones correctas sobre el total
- **Matriz de Confusión:** Visualización detallada de aciertos y errores por clase
- **F1-Score:** Media armónica entre precisión y recall
- **ROC-AUC:** Área bajo la curva ROC para evaluación multiclase

## Parte II

### Revisión Hardware & Software



# Capítulo 6

## BrainBit Headset

### 6.1. Introducción

En este capítulo se describe la implementación del dispositivo de electroencefalogramas **BrainBit** Neurotechnology Systems LLC (2024) en nuestro proyecto, centrándonos específicamente en la detección y análisis de la actividad neuronal del **lóbulo occipital** para distinguir entre la visualización mental de los colores **rojo y verde**.

### 6.2. Características Técnicas del Dispositivo

El BrainBit representa una solución portátil para la electroencefalografía (EEG), destacando por su capacidad de registro mediante **electrodos secos**. Entre sus especificaciones destacan:

- **Canales EEG:** 4 canales (T3, T4, O1, O2).
- **Frecuencia de muestreo:** 250 Hz.
- **Interfaz de comunicación:** Bluetooth Low Energy (BLE).
- **Tiempo de uso continuo:** Hasta 12 horas.
- **Ubicación de electrodos:** Conforme al sistema 10-20, con sensores en **O1 y O2** para capturar actividad occipital.

### 6.3. Relevancia del Lóbulo Occipital en el Procesamiento Visual

La corteza occipital constituye el centro neurológico principal para el procesamiento visual. En el Capítulo 3. se profundizó en la correlación entre la visualización mental de colores y la actividad cerebral en esta región, respaldado por investigaciones neurocientíficas relevantes.

## 6.4. Metodologías para la Adquisición y Procesamiento

La implementación del sistema sigue un protocolo estructurado en tres fases:

### 6.4.1. Captación de Señales

La colocación precisa de los electrodos **O1** y **O2** sobre la región occipital permite la adquisición de señales. El SDK proporciona herramientas para la captura en tiempo real, incorporando filtrado para minimizar interferencias musculares (EMG) y ambientales.

### 6.4.2. Acondicionamiento de Señales

Las señales EEG atraviesan una etapa de preprocesamiento mediante filtros digitales, eliminando artefactos y ruido que podrían interferir con el análisis posterior.

### 6.4.3. Análisis mediante Aprendizaje Profundo

La implementación incorpora modelos de **aprendizaje profundo** especializados en el análisis de series temporales EEG. Estos sistemas se entrenan para reconocer patrones específicos asociados con la visualización mental de los colores rojo y verde. Los detalles técnicos de estos modelos se expusieron en el Capítulo 5..

## 6.5. Campos de Aplicación

Esta tecnología encuentra aplicación en diversos sectores:

- Desarrollo de interfaces cerebro-máquina para asistencia a personas con diversidad funcional
- Sistemas de control en entornos estériles médicos e industriales
- Innovación en sistemas de realidad aumentada y virtual

## 6.6. Aplicación en este proyecto

La aplicación del BrainBit en la discriminación de colores mediante actividad occipital representa un enfoque innovador en interfaces cerebro-computadora. Los resultados iniciales sugieren la viabilidad de identificar patrones EEG distintivos, abriendo nuevas posibilidades para desarrollos futuros.



# Capítulo 7

## Raspberry Pi 4 Model B (8GB)

### 7.1. Introducción

La Raspberry Pi 4 Model B Raspberry Pi Foundation (2020) es un ordenador de placa única (SBC) que destaca por su equilibrio entre rendimiento, consumo energético y facilidad de programación. Este modelo incorpora un procesador ARM de 64 bits, una cantidad significativa de memoria RAM y diversas interfaces de conectividad, características que lo convierten en una opción atractiva para sistemas embebidos y aplicaciones de control. Su arquitectura ARM cuenta con amplio soporte por parte de los principales fabricantes de sistemas operativos, incluyendo distribuciones Linux empresariales y sistemas operativos en tiempo real.

### 7.2. Especificaciones Técnicas

El modelo de 8GB de la Raspberry Pi 4 se basa en la siguiente arquitectura de hardware:

#### 7.2.1. Procesador y Memoria

- CPU: Quad-Core ARM Cortex-A72 (64 bits) a 1.5GHz.
- GPU: VideoCore VI compatible con OpenGL ES 3.0.
- Memoria RAM: 8 GB LPDDR4 SDRAM.

#### 7.2.2. Requerimientos de Energía

La Raspberry Pi 4 Model B requiere una fuente de alimentación de 5V y 3A a través de un puerto USB-C. Para configuraciones que utilicen dispositivos USB adicionales, se recomienda una fuente con mayor capacidad de corriente.

### 7.2.3. Interfaces y Conectividad

- Red:
  - Gigabit Ethernet (compatible con PoE mediante un módulo adicional).
  - Wi-Fi 802.11 b/g/n/ac de doble banda (2.4 GHz y 5.0 GHz).
  - Bluetooth 5.0 con BLE.
- Almacenamiento:
  - Ranura para tarjeta microSD.
- Puertos USB:
  - 2 puertos USB 3.0.
  - 2 puertos USB 2.0.
- Vídeo y Audio:
  - 2 puertos micro-HDMI con soporte hasta 4K a 60Hz.
  - Salida de audio analógico y vídeo compuesto mediante conector TRRS de 3.5 mm.
- Expansión:
  - Conector GPIO de 40 pines compatible con modelos anteriores.
  - Conector CSI para cámaras.
  - Conector DSI para pantallas.

### 7.2.4. Consideraciones Térmicas

El sistema de gestión térmica de la Raspberry Pi 4 permite reducir la frecuencia y el voltaje del procesador en situaciones de baja carga para minimizar el consumo de energía y la generación de calor. En cargas elevadas y entornos de temperatura alta, se recomienda el uso de sistemas de disipación adicionales, como disipadores o ventiladores, para mantener la estabilidad operativa.

## 7.3. Elección de este dispositivo para el Proyecto

El modelo de 8GB de la Raspberry Pi 4 representa una solución versátil y compacta para el desarrollo del sistema de control domótico propuesto. Su amplia capacidad de memoria RAM y su rendimiento equilibrado permiten ejecutar aplicaciones complejas y procesos en tiempo real con eficiencia. Además, la compatibilidad con sistemas operativos en tiempo real y distribuciones Linux empresariales garantiza una base sólida para el desarrollo y la implementación del sistema.

# Parte III

## Marco Practico



# Capítulo 8

## Análisis Práctico

### 8.1. Objetivos Especificos

#### 8.1.1. Realizados

#### 8.1.2. Deseados (Futuras Mejoras)

### 8.2. Requistios funcionales y no funcionales

#### 8.2.1. Requisitos Funcionales

#### 8.2.2. Requisitos No Funcionales

### 8.3. Bibliotecas Usadas



## Capítulo 9

# Planificación Temporal





# Capítulo 10

## Entrenamiento del modelo

- 10.1. Descripción de la arquitectura
- 10.2. Preprocesamiento de los datos
- 10.3. Resultados del entrenamiento



# Capítulo 11

## Implementación del Core

- 11.1. Implementación del modelo
- 11.2. Consumo del SDK de BrainFlow
- 11.3. Interconexión con el sistema domótico
- 11.4. Implementación de la interfaz gráfica



## Capítulo 12

### Validación del Prototipo



# Conclusiones

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi.

Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.



# Acknowledgments

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi.

Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

# Bibliografía

- Asociación Española de Normalización (2016). UNE-EN 62304:2007/A1:2016 - Software para dispositivos médicos - Procesos del ciclo de vida del software. Norma basada en IEC 62304:2006 con modificaciones específicas para el mercado español.
- Brouwer, G. J. and Heeger, D. J. (2013). Categorical clustering of the neural representation of color. *Journal of Neuroscience*, 33(39):15454–15465.
- Kandel, E. R., Jessell, T. M., and Schwartz, J. H. (2001). *Principios de neurociencia*. McGraw-Hill Interamericana, Madrid, 4a ed. edition.
- Neurotechnology Systems LLC (2024). *BrainBit Datasheet*. Accessed: 2025-02-18.
- Raschka, S., Liu, Y. H., and Mirjalili, V. (2022). *Machine Learning with PyTorch and Scikit-Learn*. Packt Publishing, Birmingham, UK.
- Raspberry Pi Foundation (2020). *Raspberry Pi 4 Model B Datasheet*. Accessed: 2025-02-18.
- Rissman, J. and Wagner, A. D. (2012). Distributed representations in memory: Insights from functional brain imaging. *Annual Review of Psychology*, 63:101–128.
- Siewert, S. and Pratt, J. (2016). *Real-time embedded components and systems using Linux and RTOS*. Mercury Learning and Information.
- Squire, L. R. and Zola-Morgan, S. (1991). The medial temporal lobe memory system. *Science*, 253(5026):1380–1386.

