



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**
Ingeniería Electrónica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Registro y supervisión del apoyo plantar mediante plataforma baropodométrica infantil

Sergio Esteban Trujillo Varona
Juan David Restrepo Ramírez

Director

Dr. Alexánder Martínez Álvarez

Codirectora

Dra. Viviana Marcela Posada Pérez

14 de agosto de 2026

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado
en cumplimiento de los requisitos exigidos por la
Pontificia Universidad Javeriana para optar al
título de Ingeniero Electrónico.

Dr. Mateo López Victoria
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

Dr. Luis Eduardo Tobón Llano
Director Carrera Ingeniería Electrónica

Dr. Alexánder Martínez Álvarez
Director Trabajo de Grado

Dra. Viviana Marcela Posada Pérez
Co-Directora Trabajo de Grado

Jurado 1

Jurado 2

Santiago de Cali, 14 de agosto de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Mateo López Victoria
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Santiago de Cali

Cordial Saludo.

Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de Grado titulado “Registro y supervisión del apoyo plantar mediante plataforma baropodométrica infantil”.

Esperamos que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,



Juan David Restrepo Ramírez



Sergio Esteban Trujillo Varona

Santiago de Cali, 14 de agosto de 2026

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Mateo López Victoria

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “Registro y supervisión del apoyo plantar mediante plataforma baropodométrica infantil”, realizado por Sergio Esteban Trujillo Varona y Juan David Restrepo Ramírez, estudiantes de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,

Dr. Alexánder Martínez Álvarez
Director Trabajo de Grado

Dra. Viviana Marcela Posada Pérez
Co-Directora Trabajo de Grado

Agradecimientos

Sergio Esteban Trujillo Varona

En primer lugar, quiero agradecer a Dios. Para mí, Él fue indispensable durante todo este proceso y en la culminación de este proyecto, el cual tiene un propósito social tan profundo y hermoso como lo es ayudar a niños que lo necesitan. En los momentos de incertidumbre, cansancio y dificultad, siempre encontré en Él la fortaleza, la paz y el aliento para seguir adelante. Nada de esto habría sido posible sin su guía, sus bendiciones y su presencia constante en mi vida. Por ello, este logro también es suyo, y mi gratitud hacia Él será siempre infinita.

Posteriormente, quiero agradecer a mis padres: a mi mamá, por su constante preocupación e interés en ayudarme en cualquier cosa que necesitara; y a mi papá, por ser ese apoyo incondicional en todos los aspectos posibles. Estoy muy agradecido por su amor y compromiso hacia mí. Valoro todas las charlas y consejos que me brindaron; siempre estuvieron conmigo desde el día uno, y eso lo llevo y lo valoro con el corazón.

A mi hermana, por ser esa persona que vivió y escuchó todo el proceso, por sacarme una sonrisa siempre que estaba estresado, por darme su aliento y ayudarme en lo que necesitara. Ella es un pilar de mi vida con el que siempre contaré, y estoy profundamente agradecido.

A Dora, mi otra madre, por siempre estar presente, siempre al tanto de mis necesidades y siempre brindándome ese amor incondicional y justo que la caracteriza.

A mi novia, quien fue otro pilar fundamental en mi vida durante este proceso. Sus hermosos valores, su acompañamiento constante y su iniciativa para motivarme a nunca dejar de persistir fueron el motor de mis días de angustia. Gracias a ella siempre tuve un soporte emocional. Es una persona que amo y admiro, y que cada día me enseña a ser una mejor versión de mí.

A mis amigos, Harry Cifuentes y Joan Sebastian Rojas. Definitivamente, sin sus consejos, su sabiduría y su actitud propositiva, este proyecto no sería lo que es. Siempre estaré completamente agradecido por su presencia y ayuda; sus ideas enriquecieron el proyecto e hicieron que todo el proceso fuera mucho más significativo y valioso.

A mis profesores, Alexander Martínez Álvarez y Viviana Marcela Posada, por su orientación, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos, observaciones y apoyo fueron fundamentales para fortalecer este trabajo y contribuir a mi crecimiento profesional.

Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Javeriana Cali por brindarme los espacios, las herramientas y la formación académica que hicieron posible mi crecimiento como ingeniero y la realización de este proyecto.

Juan David Restrepo Ramírez

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres y a mi familia, por estar siempre pendientes de mi proceso, por su apoyo incondicional y por brindarme las oportunidades y herramientas necesarias para llegar hasta este momento. Su confianza, acompañamiento y esfuerzo fueron fundamentales durante toda mi formación profesional.

A mis compañeros y amigos de carrera, quienes se convirtieron en un grupo de apoyo a lo largo de estos años. Gracias por los momentos compartidos, por la ayuda durante las dificultades académicas y por hacer de esta etapa una experiencia más llevadera y significativa.

A mi compañero de trabajo de grado, Sergio Esteban Trujillo Varona, por su compromiso, responsabilidad y disposición durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por el trabajo realizado en equipo, por afrontar conjuntamente las dificultades que se presentaron y por contribuir a que este proyecto pudiera completarse.

A nuestro director, Alexánder Martínez Álvarez, y a nuestra codirectora, Viviana Marcela Posada Pérez, por su orientación, disposición y acompañamiento durante el desarrollo del proyecto. Sus aportes y observaciones fueron muy valiosos para avanzar, mejorar y consolidar este trabajo.

A María del Mar Marulanda y al centro terapéutico Neuroprematuros, por su disposición, colaboración y por permitirnos conocer las necesidades de su entorno. Sus aportes fueron esenciales para orientar el desarrollo del prototipo hacia una aplicación relacionada con el apoyo a la población infantil.

También agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron sus conocimientos, tiempo o ayuda durante el diseño, la construcción y las pruebas del prototipo.

Finalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Javeriana Cali y a los profesores que hicieron parte de mi formación. Cada aprendizaje, experiencia y reto vivido durante la carrera contribuyó a mi crecimiento personal y profesional. Culminar esta etapa representa para mí el resultado de años de esfuerzo, constancia y dedicación.

Glosario

Símbolos y unidades

A	Amperio. Unidad de corriente eléctrica utilizada para describir la capacidad de protección del fusible general del sistema.
cm	Centímetro. Unidad empleada para expresar las dimensiones físicas del podoscopio, el cajón inferior, el vidrio superior y la distribución de las matrices de sensores.
kg	Kilogramo. Unidad de masa utilizada para describir la carga aplicada durante las pruebas mecánicas de estabilidad estructural del prototipo.
k Ω	Kiloohmio. Unidad de resistencia eléctrica utilizada para describir las resistencias empleadas en el acondicionamiento de los sensores FSR.
μ F	Microfaradio. Unidad de capacitancia utilizada para describir capacitores de filtrado y estabilización en las líneas de alimentación del sistema.
mA	Miliamperio. Unidad de corriente eléctrica utilizada para describir el consumo aproximado de los módulos electrónicos del sistema.
mm	Milímetro. Unidad de longitud utilizada para describir dimensiones pequeñas de componentes, conectores o características físicas de los sensores.
nF	Nanofaradio. Unidad de capacitancia utilizada para describir capacitores de desacople empleados en la estabilización local de la PCB.
N	Newton. Unidad de fuerza empleada para referenciar la fuerza de actuación o el rango de sensibilidad de los sensores FSR.
s	Segundo. Unidad de tiempo utilizada para describir el intervalo de adquisición de lecturas durante la sesión.
V	Voltio. Unidad de tensión eléctrica empleada para describir señales analógicas, alimentación y niveles de operación de los circuitos electrónicos.

Acrónimos y abreviaturas

AC	Alternating Current. Corriente alterna utilizada para describir la entrada de alimentación de red del prototipo.
ADC	Conversor analógico-digital. Módulo encargado de convertir señales analógicas provenientes de los sensores en valores digitales procesables por el microcontrolador.
DC	Direct Current. Corriente continua utilizada para describir la alimentación de baja tensión suministrada a los módulos electrónicos.

ESP32	Familia de microcontroladores con capacidades de procesamiento embebido y conectividad inalámbrica, utilizada en el sistema para adquisición, comunicación, captura y almacenamiento.
ESP32-S3	Microcontrolador empleado como unidad principal de lectura de sensores y control de la etapa de adquisición.
ESP32 WROOM-32E	Módulo ESP32 empleado como unidad receptora para la captura fotográfica, recepción de datos y almacenamiento local.
FSR	Force Sensitive Resistor. Sensor resistivo de fuerza cuya resistencia eléctrica varía en función de la fuerza aplicada sobre su superficie activa.
GND	Ground. Referencia eléctrica común de 0 V utilizada en las conexiones de alimentación y señales del sistema.
GPIO	General Purpose Input/Output. Pines de entrada y salida de propósito general utilizados para controlar señales digitales del sistema embebido.
HTML	HyperText Markup Language. Lenguaje de marcado utilizado para estructurar el reporte de visualización generado por el sistema.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers. Organización internacional relacionada con estándares, publicaciones y taxonomías en ingeniería eléctrica, electrónica y áreas afines.
LED	Light Emitting Diode. Diodo emisor de luz utilizado como indicador visual de estados durante la operación del prototipo.
microSD	Tarjeta de memoria de tamaño reducido utilizada para el almacenamiento local de fotografías, lecturas de sensores y reportes de sesión.
MUX	Multiplexor. Circuito utilizado para seleccionar secuencialmente una señal entre múltiples canales de entrada.
PCB	Printed Circuit Board. Placa de circuito impreso utilizada para integrar conexiones, componentes electrónicos, multiplexores y el módulo de procesamiento.
PVDF	Polyvinylidene Fluoride. Material polimérico piezoeléctrico utilizado en algunos sensores de fuerza o presión, considerado como alternativa durante la selección de sensores.
RXD	Receive Data. Pin de recepción de datos utilizado en el ESP32 receptor para la conexión del botón físico de captura.
TXD	Transmit Data. Pin de transmisión de datos utilizado como salida digital compartida para los LEDs indicadores del ESP32 receptor.
UDP	User Datagram Protocol. Protocolo de comunicación utilizado para el envío de datos entre el ESP32-S3 lector y el ESP32 receptor dentro de la red Wi-Fi local.
USB	Universal Serial Bus. Interfaz utilizada para programación, depuración o alimentación de módulos electrónicos del sistema.
Wi-Fi	Tecnología de comunicación inalámbrica utilizada para la transmisión de datos entre módulos del sistema.

Términos

Apoyo plantar	Contacto ejercido por la planta del pie sobre una superficie de apoyo. En este proyecto se registra de forma relativa mediante sensores FSR durante la bipedestación asistida.
Baropodometría	Técnica orientada al análisis de la distribución del apoyo o presión plantar durante el contacto del pie con una superficie.
Bipedestación asistida	Postura de pie mantenida con apoyo o supervisión profesional, especialmente en usuarios que no logran sostenerla de forma independiente.
Bipedestador	Dispositivo de asistencia utilizado para mantener la postura de pie en usuarios que no logran sostenerla de forma independiente.
Cajón instrumentado	Elemento extraíble del podoscopio donde se ubican las matrices de sensores FSR y parte del cableado asociado al registro sobre sensores.
Cama de sensores	Conjunto organizado de sensores FSR distribuidos sobre el cajón instrumentado para registrar el apoyo plantar del usuario.
Captura fotográfica de la huella plantar	Registro visual realizado sobre el vidrio superior antes de la medición sobre sensores, utilizado para asociar la sesión con una referencia visual del apoyo plantar del usuario.
Divisor de voltaje	Configuración eléctrica utilizada para convertir la variación resistiva de un sensor FSR en una señal de voltaje medible por el microcontrolador.
Huella plantar	Zona de contacto del pie con una superficie de apoyo, utilizada como referencia visual para revisar la distribución general del apoyo.
Matriz de sensores	Organización rectangular de sensores dispuestos en filas y columnas para representar espacialmente los puntos de sensado.
Multiplexación	Proceso mediante el cual se seleccionan secuencialmente múltiples señales de entrada para ser leídas por un número reducido de canales analógicos.
PCB de adquisición	Placa electrónica encargada de centralizar la conexión de sensores, acondicionar señales, integrar la multiplexación y alojar el módulo de procesamiento ESP32-S3.
Podoscopio	Estructura física utilizada para observar o registrar el apoyo plantar, adaptada en este proyecto para integrar captura fotográfica, cama de sensores y electrónica de adquisición.
Presión plantar	Distribución de carga ejercida por la planta del pie sobre una superficie de apoyo. En este proyecto se aborda de forma relativa a partir de la respuesta de los sensores FSR, sin conversión a unidades absolutas de presión.

Red Wi-Fi local	Red inalámbrica generada por el ESP32 receptor para permitir la comunicación entre módulos y la descarga del informe desde un computador sin conexión a Internet.
Registro relativo	Forma de interpretación de las lecturas del sistema basada en la respuesta eléctrica de los sensores FSR, sin conversión a unidades absolutas de presión.
Reporte HTML integrado	Archivo de visualización generado por el sistema, en el cual se reúne la captura fotográfica de la huella plantar y la representación de las lecturas obtenidas desde la cama de sensores.
Sensor FSR	Sensor resistivo de fuerza cuya resistencia cambia cuando se aplica carga sobre su zona activa. En este proyecto se utiliza para registrar de forma relativa el apoyo plantar.
Sesión de medición	Registro individual compuesto por la captura fotográfica de la huella plantar, las lecturas obtenidas desde la cama de sensores y el reporte HTML integrado generado para su revisión posterior.
Trazabilidad	Capacidad de relacionar cada sesión con su captura fotográfica de la huella plantar, sus lecturas de sensores y su reporte HTML integrado correspondiente.

Resumen

Niñas y niños con antecedentes de prematuridad y trastornos neuromotores pueden presentar alteraciones del apoyo plantar que influyen en la alineación postural durante la bipedestación asistida. En el contexto terapéutico, la valoración de este apoyo suele apoyarse principalmente en la observación clínica y en registros visuales manuales, mientras que el acceso a sistemas de baropodometría puede verse limitado por su costo, disponibilidad y adaptación a la escala pediátrica. Esta situación dificulta conservar información organizada de las sesiones, revisar la distribución general del apoyo plantar y disponer de insumos complementarios para el personal tratante.

En este trabajo se desarrolló un prototipo de plataforma baropodométrica infantil basado en una estructura tipo podoscopio y una cama de sensores FSR, orientado al registro relativo del apoyo plantar durante la bipedestación asistida. El sistema integra una cama de 80 sensores distribuidos en dos matrices independientes, una etapa electrónica de adquisición, captura fotográfica de la huella plantar, almacenamiento local en memoria microSD y generación de un reporte HTML de visualización. Este reporte reúne en un mismo archivo la imagen de referencia de la huella plantar y la representación relativa del apoyo en ambos pies, permitiendo alternar entre valores numéricos y rangos de color.

La metodología incluyó el levantamiento de requisitos clínicos y técnicos, el diseño mecánico y electrónico, el desarrollo del firmware, la implementación del sistema de almacenamiento y visualización, las pruebas de funcionamiento del prototipo y una revisión de usabilidad con personal tratante. Como resultado, se obtuvo un prototipo funcional que complementa la valoración observacional mediante información visual y numérica básica del apoyo plantar, conserva registros organizados por sesión y permite descargar el último informe generado directamente desde un computador mediante una red Wi-Fi local, sin requerir conexión a Internet ni software especializado.

Palabras clave: baropodometría; población pediátrica; apoyo plantar; sensores FSR; bipedestación asistida; captura de huella plantar; reporte HTML; almacenamiento local; descarga por Wi-Fi.

Abstract

Children with a history of prematurity and neuromotor disorders may present alterations in plantar support that influence postural alignment during assisted standing. In therapeutic contexts, the assessment of plantar support is usually based mainly on clinical observation and manual visual records, while access to baropodometric systems may be limited by cost, availability, and adaptation to the pediatric scale. This situation makes it difficult to preserve organized session records, review the general distribution of plantar support, and provide complementary inputs for therapeutic staff.

This work developed a pediatric baropodometric platform prototype based on a podoscope-type structure and an FSR sensor bed, aimed at the relative recording of plantar support during assisted standing. The system integrates a bed of 80 sensors distributed in two independent matrices, an electronic acquisition stage, photographic capture of the plantar footprint, local storage on microSD, and generation of an HTML visualization report. This report combines, in a single file, the reference image of the plantar footprint and the relative support representation of both feet, allowing the user to switch between numerical values and color ranges.

The methodology included clinical and technical requirements gathering, mechanical and electronic design, firmware development, implementation of the storage and visualization system, prototype functionality testing, and a usability review with therapeutic staff. As a result, a functional prototype was obtained that complements observational assessment through basic visual and numerical information on plantar support, preserves organized session records, and allows the latest generated report to be downloaded directly from a computer through a local Wi-Fi network, without requiring Internet access or specialized software.

Keywords: baropodometry; pediatric population; plantar support; FSR sensors; assisted standing; plantar footprint capture; HTML report; local storage; Wi-Fi download.

Índice general

1. Introducción	1
2. Contextualización del Problema	3
2.1. Planteamiento del Problema	3
2.1.1. Contexto del Problema	4
2.1.2. Delimitación del Proyecto	6
2.1.3. Propósito Principal del Proyecto	6
2.1.4. Alcance y Limitaciones	7
2.1.5. Síntomas del Problema	7
2.1.6. Causas del Problema	8
2.1.7. Formulación	8
2.1.8. Sistematización	9
2.2. Justificación	10
2.2.1. Justificación Metodológica	10
2.2.2. Justificación Teórica	11
2.2.3. Justificación Práctica	11
2.3. Objetivos	11
2.3.1. Objetivo General	11
2.3.2. Objetivos Específicos	11
2.4. Marco de Referencia	12
2.4.1. Áreas Temáticas	12
2.4.2. Marco Teórico	13
2.4.3. Trabajos Relacionados	14
3. Metodología de diseño y desarrollo	16
3.1. Proceso metodológico desarrollado	16
3.2. Definición de requisitos del sistema	17
3.2.1. Requisitos clínicos y de uso	17
3.2.2. Requisitos mecánicos y ergonómicos	18
3.2.3. Requisitos electrónicos y de adquisición	18
3.2.4. Requisitos de software, visualización y almacenamiento	19
3.2.5. Requisitos de seguridad, higiene y operación	19
4. Diseño e implementación	21
4.1. Arquitectura general de la solución propuesta	21
4.2. Selección y justificación de los componentes principales	23
4.2.1. Componentes de la unidad de adquisición	23

4.2.2.	Componentes de la unidad receptora, captura y almacenamiento	25
4.2.3.	Componentes de alimentación, protección e iluminación	27
4.2.4.	Estimación económica del prototipo y comparación con sistemas comerciales .	29
4.3.	Diseño mecánico del podoscopio	32
4.3.1.	Aproximación inicial del diseño	32
4.3.2.	Estructura general y distribución mecánica	33
4.3.3.	Criterios dimensionales, estabilidad y limpieza	35
4.3.4.	Modelo tridimensional del prototipo	37
4.3.5.	Construcción física del prototipo	37
4.4.	Diseño de la cama de sensores	38
4.4.1.	Selección de sensores	39
4.4.2.	Distribución y organización de los puntos de sensado	42
4.4.3.	Conexión física entre sensores y PCB	43
4.5.	Diseño electrónico de adquisición	45
4.5.1.	Arquitectura general de la placa	46
4.5.2.	Acondicionamiento de señales de los sensores FSR	46
4.5.3.	Etapas de multiplexación de señales	47
4.5.4.	Unidad de procesamiento ESP32-S3	48
4.5.5.	Diseño físico y distribución de la PCB	48
4.5.6.	Etapas de alimentación y distribución eléctrica	50
4.6.	Sistema de comunicación, captura, almacenamiento y firmware	52
4.6.1.	Arquitectura funcional del firmware	52
4.6.2.	Firmware del ESP32-S3 lector	53
4.6.3.	Firmware del ESP32 receptor	54
4.6.4.	Comunicación inalámbrica entre módulos	54
4.6.5.	Control de estados e indicadores	54
4.6.6.	Almacenamiento local y descarga del informe	55
4.6.7.	Alcance del procesamiento y visualización	57
4.6.8.	Flujo general de operación del sistema	58
5.	Pruebas y evaluación del prototipo	59
5.1.	Alcance de las pruebas realizadas	59
5.2.	Pruebas mecánicas	59
5.2.1.	Prueba de carga estructural	59
5.2.2.	Prueba de estabilidad y desplazamiento del cajón	61
5.3.	Pruebas de alimentación y seguridad eléctrica	61
5.3.1.	Prueba de entrada de alimentación a 120 V AC	61
5.3.2.	Medición de corriente en la entrada AC	62
5.3.3.	Estimación del consumo de la etapa DC	63
5.3.4.	Prueba de alimentación DC para los microcontroladores	65
5.3.5.	Estimación de la corriente máxima de entrada	65

5.3.6.	Prueba de encendido y apagado del sistema	66
5.3.7.	Prueba de aislamiento interno	67
5.3.8.	Prueba de aislamiento externo	67
5.3.9.	Dimensionamiento y verificación del fusible de 0,5 A	68
5.3.10.	Resumen de resultados de alimentación	69
5.4.	Prueba funcional de cámara e iluminación	70
5.5.	Pruebas funcionales de sensores FSR	71
5.5.1.	Pruebas individuales de sensores	71
5.5.2.	Pruebas por matriz	71
5.6.	Pruebas de comunicación, firmware y operación integrada	72
5.6.1.	Verificación de comunicación y control del firmware	72
5.6.2.	Verificación de almacenamiento y reporte HTML	72
5.6.3.	Verificación de descarga por Wi-Fi local	72
5.6.4.	Resultado de la prueba integrada	73
5.7.	Criterios generales de estabilidad, repetibilidad y coherencia	73
5.8.	Evaluación de usabilidad e integración al flujo terapéutico	73
5.8.1.	Retroalimentación del personal tratante	74
5.8.2.	Integración al flujo de trabajo	75
6.	Resultados y Discusión	76
6.1.	Resultados principales	76
6.2.	Resumen de resultados de las pruebas	78
6.3.	Informe HTML generado	78
6.3.1.	Información general y fotografía del registro	79
6.3.2.	Visualización de las matrices por colores	80
6.3.3.	Visualización porcentual e identificación de los sensores	81
6.3.4.	Resumen técnico del registro	83
6.4.	Resultado de los sensores	84
6.5.	Resultado de usabilidad	84
6.6.	Discusión	85
6.7.	Limitaciones de los resultados	86
7.	Conclusiones	87
8.	Recomendaciones	90
8.1.	Mantenimiento de la cama de sensores	90
8.2.	Estandarización de las condiciones de medición	90
8.3.	Mejoras mecánicas y de mantenimiento	91
8.4.	Seguridad eléctrica y alimentación	91
8.5.	Limpieza e higiene operativa	92
8.6.	Mejoras de firmware y visualización	92
8.7.	Ampliación de las pruebas de funcionamiento	93

8.8. Uso terapéutico y alcance del sistema	93
8.9. Capacitación del personal tratante	93

9. Anexos **95**

1. Esquemáticos complementarios ampliados de la matriz de sensores	96
2. Código principal del ESP32-S3 lector	99
3. Código principal del ESP32 receptor	111
4. Manual de Usuario	150
5. Evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción e integración . . .	164
6. Evidencias audiovisuales complementarias de verificación	166
7. Esquemáticos complementarios ampliados de alimentación e indicadores	167
8. Consentimiento informado para participación en pruebas	170
9. Informe HTML completo generado por el prototipo	173

Bibliografía **174**

Índice de figuras

2.1. Apoyo en bipedestación asistida mediante dispositivos no instrumentados en el centro terapéutico <i>Neuroprematuros</i>	4
2.2. Condiciones de registro no instrumentado del apoyo plantar infantil durante sesiones de valoración clínica.	6
4.1. Diagrama de contexto del sistema de registro y supervisión del apoyo plantar.	21
4.2. Arquitectura general de la solución propuesta, integrando adquisición de lecturas FSR, captura fotográfica, recepción, almacenamiento local, descarga inalámbrica y visualización.	22
4.3. Comparación de precios de sistemas comerciales relacionados con el registro o análisis del apoyo plantar. Los valores se presentan en pesos colombianos.	31
4.4. Bocetos preliminares utilizados para la aproximación inicial del diseño mecánico del podoscopio.	33
4.5. Plano general del diseño mecánico del podoscopio.	34
4.6. Ubicación de la cama de sensores sobre el cajón inferior instrumentado.	35
4.7. Vista explotada referencial de los elementos mecánicos del podoscopio.	36
4.8. Modelos tridimensionales del podoscopio con cajón inferior instrumentado.	37
4.9. Etapas principales de construcción y adecuación física del podoscopio.	38
4.10. Distribución física de los 80 sensores FSR 402 sobre el cajón instrumentado	43
4.11. Organización interna del cableado de los sensores FSR hacia los conectores de la PCB de adquisición.	44
4.12. Asignación de los sensores FSR 402 a los conectores y pines de la PCB de adquisición para las matrices izquierda y derecha.	45
4.13. Esquemático representativo de una matriz de 40 sensores FSR con acondicionamiento mediante divisores de voltaje.	47
4.14. Esquemático de la etapa de microcontrolador, programación y señales de control de la PCB de adquisición.	48
4.15. Distribución física de la PCB en sus capas superior e inferior.	49
4.16. PCB fabricada para la conexión de los sensores FSR, la etapa de multiplexación y el módulo de procesamiento ESP32-S3.	50
4.17. Esquemático eléctrico de alimentación y distribución general del podoscopio.	51
4.18. Conexión de LEDs indicadores y botón de captura en el ESP32 receptor con cámara.	52
4.19. Arquitectura funcional del firmware, indicando la distribución de tareas entre el ESP32-S3 lector y el ESP32 WROOM-32E receptor.	53
4.20. Interfaz web local del ESP32 receptor para verificación del sistema, sincronización de fecha/hora y descarga del último informe generado.	56
4.21. Flujo general de operación del sistema durante una sesión de registro del apoyo plantar.	58

5.1. Prueba de carga estructural del podoscopio y del vidrio superior con una masa aproximada de 50 kg.	60
5.2. Verificación de la tensión de entrada aproximada de 120 V AC en el conector principal del prototipo.	62
5.3. Mediciones de corriente alterna realizadas con pinza voltiamperimétrica.	63
5.4. Verificación de la salida de alimentación aproximada de 5 V DC para los microcontroladores del prototipo.	65
5.5. Verificación del aislamiento interno de la etapa de alimentación del prototipo.	67
5.6. Verificación del fusible de 0,5 A instalado en el conector de entrada de alimentación del prototipo.	69
5.7. Prueba de captura fotográfica de huella e iluminación interna del podoscopio.	71
5.8. Comprobación del funcionamiento del prototipo dentro del flujo terapéutico del centro.	74
6.1. Prototipo final de la plataforma baropodométrica infantil completamente ensamblado.	77
6.2. Información general de la sesión y fotografía capturada sobre el vidrio incluida en el informe HTML.	80
6.3. Visualización por rangos de color de las matrices izquierda y derecha en el informe HTML.	81
6.4. Visualización porcentual e identificación alfanumérica de los sensores en las matrices del informe HTML.	82
6.5. Resumen técnico del registro e información complementaria incluida en el informe HTML.	83
9.1. Versión ampliada del diseño 1 del esquemático complementario de la matriz de sensores FSR.	96
9.2. Versión ampliada del diseño 2 del esquemático complementario de la matriz de sensores FSR.	97
9.3. Versión ampliada del diseño 3 del esquemático complementario de la matriz de sensores FSR.	98
9.4. Evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción, conexión preliminar, integración y modificación final del prototipo.	164
9.5. Evidencia complementaria del montaje del módulo receptor encargado de la captura fotográfica, almacenamiento local y generación del informe.	165
9.6. Versión ampliada del esquemático eléctrico de alimentación general del podoscopio.	168
9.7. Versión ampliada del esquemático de conexión de LEDs indicadores y botón de captura del ESP32 receptor.	169

Índice de cuadros

4.1. Componentes principales seleccionados para la unidad de adquisición.	25
4.2. Componentes principales seleccionados para la unidad receptora, captura y almacenamiento.	27
4.3. Componentes principales seleccionados para la alimentación, protección e iluminación del prototipo.	28
4.4. Estimación económica de los componentes, materiales y actividades del prototipo. . .	29
4.5. Dimensiones principales del diseño mecánico del podoscopio.	36
4.6. Resumen comparativo de las alternativas de sensado evaluadas para la selección del sensor de presión de la cama instrumentada.	39
4.7. Estados principales indicados por el firmware durante la operación.	55
5.1. Resultados de las pruebas y cálculos de alimentación del prototipo.	70
6.1. Resumen de resultados obtenidos en las pruebas del prototipo.	78

Introducción

La valoración del apoyo plantar es importante porque permite revisar cómo se distribuye el contacto de los pies durante la postura de pie, aportando información relacionada con la alineación corporal, la estabilidad y la forma en que el usuario carga su peso sobre la superficie de apoyo. En el contexto terapéutico, esta información puede complementar la observación clínica y apoyar la documentación del proceso de bipedestación asistida, especialmente cuando se requiere conservar registros para revisar la evolución entre sesiones.

Esta valoración adquiere mayor relevancia en niñas y niños con antecedentes de prematuridad y trastornos neuromotores, como la parálisis cerebral, debido a que estas condiciones pueden alterar el control postural y la adquisición de hitos motores como la bipedestación, afectando la alineación corporal, la carga articular y la participación terapéutica [1, 2, 3]. En estos casos, la revisión del apoyo plantar suele apoyarse principalmente en la observación clínica y en registros visuales manuales, aunque la distribución del apoyo durante la postura de pie puede aportar información complementaria para la documentación y el seguimiento terapéutico.

La baropodometría permite analizar la distribución de presiones plantares [4]; sin embargo, las soluciones comerciales suelen estar orientadas a población adulta o deportiva y presentan barreras de costo, disponibilidad e integración al flujo terapéutico pediátrico [5, 6]. En el contexto del centro terapéutico en el que se desarrolló este proyecto, la incorporación de plataformas comerciales especializadas se veía limitada por sus costos de adquisición, mantenimiento e integración operativa. Además, en población infantil la morfología del pie, el área de contacto y los patrones de apoyo cambian con el crecimiento, por lo que una herramienta de registro debe considerar tallas pequeñas, higiene, seguridad y facilidad de interpretación durante la sesión [7].

En este trabajo se desarrolló una plataforma baropodométrica infantil basada en una estructura tipo podoscopio y una cama de sensores FSR, orientada al registro relativo del apoyo plantar durante la bipedestación asistida. El sistema permite capturar lecturas relativas de los sensores, representar visualmente la distribución general del apoyo en ambos pies y asociar cada sesión con una captura fotográfica de la huella plantar. De esta manera, la solución complementa la valoración observacional del personal tratante mediante información visual y numérica básica, sin reemplazar el criterio clínico ni asumir mediciones absolutas de presión.

El prototipo incorpora almacenamiento local en memoria microSD y genera un reporte HTML integrado, en el cual se reúnen la captura fotográfica de la huella plantar y la visualización de las matrices de sensores. Además, permite descargar el último informe generado mediante una red Wi-Fi local, sin requerir conexión a Internet ni software especializado. Desde la ingeniería, la selección y el acondicionamiento de los sensores, la adquisición de lecturas y la visualización se fundamentan en criterios de sensibilidad, estabilidad, facilidad de integración y claridad de interpretación [8, 9, 10].

En el contexto del centro terapéutico Neuroprematuros, la población potencialmente beneficiaria abarca niñas y niños entre los 8 meses y los 5 años, lo que orientó el dimensionamiento de la plataforma, la distribución de sensores y el flujo de operación. En síntesis, este trabajo aportó una herramienta funcional de apoyo para registrar, visualizar y conservar información organizada del apoyo plantar infantil durante sesiones de bipedestación asistida.

Contextualización del Problema

2.1. Planteamiento del Problema

El centro terapéutico *Neuroprematuros* atiende población infantil con antecedentes de prematuridad, alteraciones neuromotoras y dificultades asociadas al desarrollo motor, ofreciendo procesos de acompañamiento terapéutico orientados a favorecer la adquisición de habilidades posturales y funcionales. Su trabajo se realiza en contacto directo con niñas, niños y familias que requieren seguimiento continuo, orientación profesional y estrategias de intervención ajustadas a sus condiciones clínicas, funcionales y socioeconómicas.

Dentro de este contexto, la disponibilidad de herramientas tecnológicas especializadas representa un desafío importante. Muchos sistemas comerciales de valoración biomecánica o baropodométrica tienen costos elevados de adquisición, mantenimiento e integración, lo que dificulta su incorporación en centros terapéuticos que deben priorizar soluciones funcionales, seguras, sostenibles y adaptadas a las necesidades reales de la población atendida. Por esta razón, el desarrollo de alternativas tecnológicas propias, de menor complejidad operativa y ajustadas al flujo de trabajo del centro, adquiere relevancia como apoyo a la documentación y seguimiento terapéutico.

En niñas y niños con antecedentes de prematuridad, parálisis cerebral u otros síndromes neurológicos que comprometen el sistema motor, la bipedestación constituye un componente importante para el desarrollo postural, el acondicionamiento músculo-esquelético y la participación en procesos terapéuticos de rehabilitación [1, 2, 3]. La parálisis cerebral es reconocida como una de las principales causas de discapacidad motora en la infancia, con una prevalencia global estimada entre 1.5 y 2.5 casos por cada 1 000 nacidos vivos; sin embargo, en Colombia no se dispone de estadísticas nacionales específicas sobre esta condición, sino de reportes generales de discapacidad en población infantil [11].

En el centro terapéutico *Neuroprematuros*, el apoyo en posición de pie se realiza mediante bipedestadores convencionales y superficies no instrumentadas, como se muestra en la Figura 2.1. En este escenario, la valoración del apoyo plantar durante la bipedestación asistida se apoya principalmente en la observación clínica y en registros visuales manuales. Aunque esta práctica aporta información útil para el personal tratante, presenta limitaciones para conservar registros organizados, revisar la distribución general del apoyo plantar y comparar la información entre sesiones.



Figura 2.1: Apoyo en bipedestación asistida mediante dispositivos no instrumentados en el centro terapéutico *Neuroprematuros*.

El problema central es la ausencia de una herramienta que complemente de manera sistemática la valoración observacional del apoyo plantar durante la bipedestación infantil. Esta carencia dificulta registrar y visualizar la distribución general del apoyo, comparar el comportamiento entre ambos pies y conservar información organizada por sesión, lo que limita la documentación del proceso terapéutico y el seguimiento de los usuarios.

Aunque existen sistemas comerciales de baropodometría, estos suelen estar orientados a población adulta o deportiva, presentan dificultades de adaptación a la escala pediátrica y requieren condiciones de adquisición, mantenimiento e integración que no siempre se ajustan al flujo terapéutico del centro. Además, sus costos y la posible dependencia de software especializado limitaban su incorporación previa en el centro terapéutico. Esta barrera se retoma en apartados posteriores del documento, donde se relacionan las necesidades del centro con la viabilidad técnica, operativa y presupuestal del prototipo desarrollado [5, 6, 7].

En consecuencia, el proyecto respondió a la necesidad de contar con una alternativa funcional, viable e integrable al entorno de uso, que permitiera complementar la observación clínica mediante un registro instrumentado, visual y numérico básico del apoyo plantar, adaptado a la población infantil y al contexto operativo del centro terapéutico.

2.1.1. Contexto del Problema

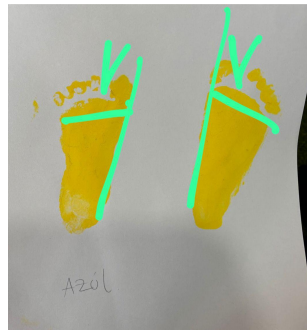
Actualmente, el posicionamiento y apoyo en bipedestación de esta población se realiza con bipedestadores y superficies no instrumentadas. En el centro terapéutico, la valoración del apoyo plantar se realiza de forma artesanal: se toman huellas plantares con pintura sobre papel y, a

partir de estas, se efectúa una revisión manual de la huella, como se muestra en la Figura 2.2. Posteriormente, la terapeuta ajusta el alineamiento y registra observaciones clínicas sin contar con un sistema instrumentado que organice la información de la sesión.

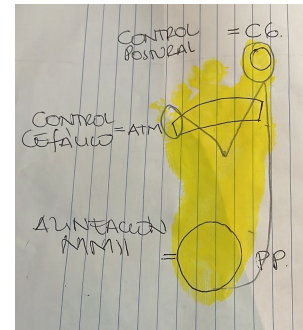
Este procedimiento permite obtener una referencia visual del apoyo plantar; sin embargo, presenta limitaciones para el seguimiento sistemático de los usuarios, entre ellas:

- **Registro artesanal y variabilidad del análisis:** las huellas con pintura aportan evidencia visual estática, pero no registran la distribución relativa del apoyo durante la bipedestación. Además, su interpretación depende de la experiencia del observador, lo que puede dificultar la comparación entre sesiones.
- **Ausencia de información numérica complementaria:** durante la sesión no se dispone de una herramienta que permita registrar, visualizar y conservar de manera organizada la respuesta del apoyo plantar sobre una superficie instrumentada.
- **Limitaciones de adaptación al pie infantil y bioseguridad:** los cambios de talla propios del crecimiento, las características de la población pediátrica y las condiciones de higiene del entorno terapéutico requieren superficies compatibles con usuarios infantiles y fáciles de limpiar.
- **Disponibilidad limitada de sistemas adecuados:** las plataformas comerciales existentes suelen estar orientadas a población adulta o deportista y presentan desafíos de adaptación al contexto terapéutico pediátrico en aspectos como área activa, resolución espacial, materiales y flujo de uso durante la sesión.
- **Barreras de acceso a sistemas comerciales:** aunque existen sistemas comerciales de baropodometría que podrían aportar información detallada del apoyo plantar, sus costos de adquisición, mantenimiento y posible dependencia de software especializado dificultaron su incorporación previa en el centro. Frente a esta situación, el prototipo desarrollado se orientó como una alternativa funcional, de operación sencilla e integrable al flujo terapéutico, priorizando el registro relativo del apoyo plantar.

Estas dificultades limitan la disponibilidad de información organizada sobre el apoyo plantar durante las sesiones de bipedestación y aumentan la dependencia de registros principalmente observacionales. Como consecuencia, se dificulta la comparación entre sesiones y la conservación de evidencia que apoye el seguimiento de los usuarios dentro del proceso terapéutico.



(a) Ajuste postural durante la bipedestación asistida.



(b) Registro clínico sin estandarización instrumentada.

Figura 2.2: Condiciones de registro no instrumentado del apoyo plantar infantil durante sesiones de valoración clínica.

2.1.2. Delimitación del Proyecto

El proyecto se delimitó al diseño, construcción e integración de un prototipo funcional de plataforma baropodométrica infantil para apoyar el registro del apoyo plantar durante la bipedestación asistida. Su ámbito principal de uso corresponde al centro terapéutico *Neuroprematuros*, en Santiago de Cali, y su operación se plantea exclusivamente bajo supervisión del personal tratante.

La población objetivo corresponde a niñas y niños entre 8 meses y 5 años, con antecedentes de prematuridad o alteraciones neuromotoras, que se encuentren en proceso de adquisición, entrenamiento o seguimiento de la bipedestación asistida. Por tanto, el sistema no se limita a usuarios que logren mantenerse de pie de forma independiente, sino a aquellos que, de acuerdo con el criterio del fisioterapeuta, puedan realizar apoyo plantar con asistencia profesional.

Durante el uso del prototipo, el personal tratante debe acompañar al niño, ubicar sus pies sobre la zona de medición y vigilar la postura durante todo el registro. La medición se plantea con ambos pies descalzos sobre la cama de sensores, sin calzado, férulas u ortesis, debido a que el sistema fue diseñado para registrar el contacto directo del pie con la superficie instrumentada.

En casos de apoyo parcial, unilateral o con contacto incompleto, el sistema puede registrar la información proveniente de las zonas que efectivamente entren en contacto con los sensores. Sin embargo, esta condición debe ser interpretada por el profesional como un registro parcial del apoyo y no como una medición bilateral completa.

2.1.3. Propósito Principal del Proyecto

El propósito principal del proyecto es complementar la valoración observacional del apoyo plantar durante la bipedestación infantil mediante un prototipo que permita registrar, visualizar y conservar información organizada de cada sesión. El sistema busca aportar una referencia visual y numérica básica sobre el apoyo de ambos pies, de manera que el personal tratante pueda revisar la información obtenida durante o después de la sesión.

De esta forma, el prototipo se plantea como una herramienta de apoyo para el seguimiento terapéutico, orientada a facilitar la documentación del proceso, la revisión entre sesiones y la conservación de registros asociados a cada usuario. Su propósito no es reemplazar el criterio profesional ni realizar diagnóstico clínico, sino aportar información complementaria que apoye la observación realizada por el personal tratante.

2.1.4. Alcance y Limitaciones

Dada la ventana temporal, los recursos disponibles y las necesidades identificadas en el centro terapéutico, el alcance del proyecto comprendió el diseño, construcción e integración de un prototipo funcional de plataforma baropodométrica infantil para apoyar el registro del apoyo plantar durante la bipedestación asistida. El sistema se planteó para uso supervisado por el personal tratante, con capacidad de registrar información de la sesión, visualizar la distribución relativa del apoyo plantar y conservar los registros para consulta posterior.

La verificación del prototipo se enfocó en pruebas de funcionamiento de los subsistemas principales, revisión de la respuesta de la superficie instrumentada, generación de registros de sesión y evaluación de la integración al flujo de trabajo con personal tratante. Estas actividades permitieron revisar la operación general del sistema, sin que ello constituyera una validación clínica o metrológica formal.

Como limitaciones, el prototipo fue desarrollado para población infantil entre 8 meses y 5 años, con una resolución de sensado orientada a representar zonas generales de apoyo en ambos pies durante bipedestación asistida. Por tanto, no cubre análisis de marcha, diagnóstico clínico, cálculo de presión absoluta ni indicadores avanzados propios de plataformas clínicas especializadas. La evaluación se limitó al desempeño funcional del prototipo y a su operatividad dentro del contexto del centro terapéutico, sin pretender generalizar los resultados más allá de esta fase del proyecto.

2.1.5. Síntomas del Problema

Las consecuencias de carecer de una herramienta instrumentada para apoyar la valoración del apoyo plantar durante la bipedestación infantil se evidencian en distintos aspectos de la práctica terapéutica y del seguimiento de los usuarios:

- **Seguimiento limitado del progreso:** dificultad para documentar, con información visual y numérica básica, los cambios observados entre sesiones.
- **Ajustes posturales principalmente observacionales:** dependencia de la observación clínica para realizar correcciones sucesivas del apoyo, sin un registro instrumentado que complemente la valoración del personal tratante.
- **Diferencias de apoyo poco documentadas:** variaciones generales entre el apoyo del pie izquierdo y el pie derecho que pueden no conservarse de forma sistemática.

- **Comparación limitada entre sesiones:** dificultad para revisar registros previos, contrastar la evolución del apoyo plantar y comunicar de manera organizada los hallazgos al personal tratante o a los cuidadores.

2.1.6. Causas del Problema

El problema se origina en la ausencia de una solución adaptada al contexto pediátrico del centro, que permita registrar, visualizar y conservar información organizada sobre el apoyo plantar durante la bipedestación asistida. Entre las causas principales se identifican:

- **Dependencia de métodos observacionales y artesanales:** la valoración se apoya en la observación clínica, notas narrativas y huellas con pintura sobre papel, sin una herramienta que registre de forma organizada la información de la sesión.
- **Falta de soluciones pediátricas adaptadas:** las plataformas comerciales de baropodometría suelen estar orientadas a población adulta o deportista, con áreas de apoyo, resolución, materiales y flujos de uso que no siempre se ajustan al contexto terapéutico infantil.
- **Restricciones presupuestales e institucionales:** los costos de adquisición, mantenimiento y posible dependencia de software especializado dificultan la incorporación de sistemas comerciales en el centro terapéutico.
- **Ausencia de registro estructurado por sesión:** la información obtenida durante la valoración no queda organizada de manera digital por usuario y sesión, lo que limita la revisión posterior y la comparación general entre registros.

2.1.7. Formulación

El desarrollo del proyecto respondió a la siguiente pregunta fundamental:

¿Cómo diseñar e implementar un prototipo de plataforma baropodométrica infantil, viable para el contexto del centro terapéutico, que complemente la valoración observacional del apoyo plantar durante la bipedestación asistida mediante el registro, visualización y conservación organizada de información por sesión?

Esta pregunta se sustentó en la necesidad de apoyar la valoración postural en población pediátrica con antecedentes de prematuridad y trastornos neuromotores, integrando la observación clínica con información visual y numérica básica del apoyo plantar [1, 2]. Asimismo, consideró las particularidades del pie infantil, las condiciones de uso durante la bipedestación asistida y las restricciones del contexto terapéutico, incluyendo la necesidad de una solución funcional y viable para el centro [7].

Para responder a esta pregunta, el proyecto consideró los siguientes aspectos generales:

- **Necesidades clínicas y de uso:** condiciones de operación, supervisión, seguridad e higiene requeridas para utilizar el prototipo con población infantil durante bipedestación asistida.

- **Diseño funcional de la plataforma:** integración mecánica, electrónica y de visualización necesaria para registrar el apoyo plantar de ambos pies de manera organizada y compatible con el flujo de trabajo del centro.
- **Registro y revisión de la información:** conservación de la información obtenida durante cada sesión para facilitar su consulta posterior y apoyar la comparación general entre registros.
- **Verificación e integración al entorno terapéutico:** revisión del funcionamiento general del prototipo y de su incorporación al proceso de valoración realizado por el personal tratante.

Estos aspectos permitieron orientar el desarrollo de un prototipo funcional dirigido a complementar la valoración observacional del apoyo plantar infantil, aportar una representación visual y numérica básica de la sesión y conservar registros organizados para apoyar el seguimiento de los usuarios en el contexto del centro terapéutico.

2.1.8. Sistematización

Para abordar la problemática de forma estructurada y orientar el desarrollo del prototipo, se organizaron subpreguntas en cuatro dimensiones: identificación del problema, diseño de la plataforma, implementación funcional y verificación del sistema.

1. Identificación del problema y de los usuarios

- ¿Cuáles fueron las principales dificultades del personal tratante durante la valoración del apoyo plantar en bipedestación asistida?
- ¿Qué información visual y numérica básica se requería para complementar la valoración observacional y conservar registros entre sesiones?

2. Diseño de la plataforma baropodométrica

- ¿Qué configuración mecánica y de sensado permitía registrar el apoyo plantar infantil de ambos pies de forma organizada?
- ¿Cómo diseñar una solución funcional y viable para el centro terapéutico, considerando las restricciones de uso, higiene, seguridad y presupuesto?

3. Implementación funcional del prototipo

- ¿Qué elementos de hardware, software y operación eran necesarios para registrar, visualizar y conservar la información de cada sesión?
- ¿Cómo integrar el prototipo al flujo de trabajo del centro sin reemplazar la observación clínica del personal tratante?

4. Verificación e integración al entorno terapéutico

- ¿Qué pruebas de funcionamiento permitieron revisar la respuesta del sistema, la coherencia del registro y la generación de información para consulta posterior?
- ¿Qué observaciones del personal tratante permitieron valorar la utilidad del prototipo y orientar posibles ajustes de operación o interfaz?

Estas subpreguntas permitieron descomponer el problema en componentes operativos y verificables, orientando el diseño, la implementación, la verificación funcional y la integración del prototipo al contexto terapéutico del centro.

2.2. Justificación

El desarrollo del prototipo de plataforma baropodométrica infantil respondió a una necesidad concreta del centro terapéutico *Neuroprematuros*: complementar la valoración observacional del apoyo plantar mediante una herramienta funcional que permitiera registrar, visualizar y conservar información organizada de cada sesión. Esta necesidad es relevante en niñas y niños entre 8 meses y 5 años con antecedentes de prematuridad y trastornos neuromotores, en quienes la bipedestación asistida requiere seguimiento por parte del personal tratante [1, 2]. En el contexto del centro, la disponibilidad de sistemas comerciales especializados se ve limitada por sus costos de adquisición, mantenimiento e integración al flujo terapéutico pediátrico. Por esta razón, el prototipo desarrollado se planteó como una alternativa funcional adaptada a la escala infantil y al entorno de uso, priorizando una operación supervisada, una visualización clara y la conservación organizada de los registros obtenidos. El prototipo permite asociar una referencia visual de la huella plantar con una representación numérica y gráfica básica del apoyo registrado, facilitando la revisión posterior y la documentación de las sesiones. Desde el punto de vista académico e ingenieril, el proyecto integró criterios de biomecánica, instrumentación electrónica, diseño mecánico, adquisición de señales y visualización de información en una solución aplicada al contexto de rehabilitación pediátrica.

2.2.1. Justificación Metodológica

El proyecto se enmarcó en una línea de ingeniería aplicada a la rehabilitación pediátrica, con énfasis en instrumentación y visualización de información asociada al apoyo plantar. Su desarrollo se apoyó en antecedentes sobre posicionamiento y control postural en población infantil con alteraciones neuromotoras [2], particularidades del pie infantil [7] y tecnologías de sensado aplicadas al registro de cargas en sistemas instrumentados [8, 9].

Desde el enfoque metodológico, el proyecto permitió relacionar necesidades del entorno terapéutico con decisiones de diseño mecánico, electrónico y de visualización. Para ello, se definieron requisitos de uso, se implementó un prototipo funcional y se realizaron pruebas de funcionamiento orientadas a revisar la adquisición de lecturas, la organización de la información y la representación visual generada por el sistema.

2.2.2. Justificación Teórica

El proyecto articuló fundamentos de biomecánica del apoyo plantar y control postural con principios de instrumentación electrónica, adquisición de señales y visualización de información asociada al apoyo sobre una plataforma. La representación relativa del apoyo plantar mediante una cama de sensores permitió conectar conceptos de postura, contacto plantar e instrumentación con una solución aplicada al contexto terapéutico pediátrico.

De esta manera, el desarrollo realizado establece un puente entre teoría y práctica al transformar señales provenientes de sensores FSR en registros visuales y numéricos básicos, útiles para complementar la valoración observacional y apoyar la revisión general de sesiones, sin asumir indicadores clínicos avanzados ni mediciones absolutas de presión [7, 2].

2.2.3. Justificación Práctica

El prototipo desarrollado:

- Incorporó un registro instrumentado y una visualización relativa del apoyo plantar durante la bipedestación asistida, complementando la valoración observacional del personal tratante.
- Facilitó la revisión del apoyo plantar mediante una representación visual de zonas con mayor o menor respuesta relativa, sin reemplazar el criterio clínico del profesional.
- Consolidó un registro estructurado por usuario y sesión, incluyendo las lecturas obtenidas y la captura fotográfica asociada, lo que facilita la consulta posterior y la comparación general entre registros.
- Integró criterios de operación, limpieza y resguardo acordes con los requisitos de higiene, seguridad y protección de los componentes en el entorno terapéutico.

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General

Desarrollar una plataforma baropodométrica para población pediátrica con alteraciones neuromotoras, orientada al registro, visualización y conservación organizada de información relativa del apoyo plantar durante la bipedestación asistida, como herramienta complementaria para la documentación de sesiones y el apoyo a la valoración del personal tratante.

2.3.2. Objetivos Específicos

- Definir los requisitos clínicos, de uso y técnicos de la plataforma para el contexto del centro terapéutico, considerando las necesidades de registro, el flujo de trabajo, las zonas de interés y los criterios del personal tratante.

- Diseñar la arquitectura de hardware, firmware y visualización para registrar lecturas relativas del apoyo plantar y representar la información obtenida en ambos pies durante la bipedestación asistida.
- Implementar un prototipo funcional apto para uso supervisado en sesión, con captura local de información, visualización de los registros obtenidos, almacenamiento básico y lineamientos de operación y limpieza.
- Verificar el funcionamiento técnico del prototipo mediante pruebas de carga estructural, alimentación, respuesta de sensores, estabilidad funcional, repetibilidad básica y coherencia entre la zona activada y la representación visual del apoyo plantar.
- Evaluar la usabilidad e integración de la plataforma en el flujo de trabajo del centro y las necesidades de ajuste de diseño e interfaz.

2.4. Marco de Referencia

2.4.1. Áreas Temáticas

- Biomedical engineering — Rehabilitation — Assistive devices — Posture and standing technologies.
- Biomedical engineering — Biomechanics — Plantar support analysis — Postural control.
- Instrumentation and measurement — Sensors — Force and pressure sensing — Analog signal acquisition.
- Instrumentation and measurement — Signal conditioning — Data acquisition — Multiplexing and ADC.
- Computers and information processing — Embedded systems — Embedded software.
- Computers and information processing — Information visualization — Session reports and visual records.
- Computers and information processing — Human-computer interaction — User-centered design — Clinical usability.
- General topics for engineers — Ethics — Privacy and data protection — Pediatric biosecurity.

Nota de clasificación: las áreas anteriores se organizaron siguiendo la taxonomía y familias de conocimiento publicadas por IEEE y la IEEE Computer Society, adoptando su nomenclatura como referencia para mantener trazabilidad y estandarización terminológica en la clasificación temática del proyecto [12, 13].

2.4.2. Marco Teórico

Neurodesarrollo y rehabilitación pediátrica. La prematuridad y los trastornos neuromotores, como la parálisis cerebral, pueden alterar el control postural y la adquisición de hitos motores como sentarse, ponerse de pie y mantener la bipedestación. La literatura clínica y de neurorrehabilitación resalta el uso de estrategias de posicionamiento y bipedestación asistida para favorecer la alineación, la participación y el acondicionamiento músculo-esquelético en población pediátrica [1, 2, 3]. En este contexto, disponer de registros visuales y numéricos complementarios puede apoyar la documentación del proceso terapéutico y la revisión posterior por parte del personal tratante.

Bipedestación asistida y apoyo plantar. Un bipedestador es un dispositivo de asistencia que permite mantener la postura de pie cuando el usuario no logra hacerlo de forma independiente, mediante soportes ajustables que favorecen la alineación corporal bajo supervisión profesional [2]. En programas de rehabilitación pediátrica, estos dispositivos se emplean dentro del manejo postural y se han asociado con beneficios potenciales en funciones corporales, participación y bienestar psicosocial [3]. Durante esta postura, el registro del apoyo plantar puede complementar la observación clínica al conservar información organizada sobre la distribución general del apoyo en ambos pies.

Biomecánica del pie infantil. El pie infantil presenta superficies de contacto reducidas y patrones de apoyo que cambian con la edad. Además, las malposiciones, malformaciones congénitas o necesidades ortésicas pueden modificar la huella plantar [7]. En plataformas especializadas, estas variaciones pueden analizarse mediante métricas avanzadas; sin embargo, en este prototipo la información se abordó mediante una representación relativa y general de las zonas de apoyo, sin calcular indicadores clínicos avanzados ni presión absoluta.

Instrumentación plantar y soluciones existentes. Existen soluciones comerciales de instrumentación plantar con alta densidad sensorial y software especializado para análisis de marcha, podología, ortopedia o rendimiento humano [5, 6]. No obstante, su enfoque hacia población adulta o deportiva, sus requerimientos de infraestructura y sus costos de adquisición e integración pueden dificultar su incorporación directa en entornos terapéuticos pediátricos. Por ello, el proyecto se orientó al desarrollo de una alternativa funcional centrada en el registro relativo del apoyo plantar y en la integración al flujo de sesión del centro.

Principios de sensado y acondicionamiento. Para registrar variaciones de apoyo plantar en áreas reducidas pueden emplearse tecnologías piezorresistivas, capacitivas o resistivas de fuerza. Su selección debe considerar sensibilidad, estabilidad de lectura, tamaño, disponibilidad, facilidad de integración y compatibilidad con la arquitectura de adquisición. Textos y trabajos académicos ofrecen fundamentos sobre transducción, acondicionamiento de señales, filtrado y adquisición analógica en sistemas instrumentados [14, 8, 9]. En este proyecto, estos principios se aplicaron para implementar una lectura relativa de sensores FSR, sin asumir calibración metrológica formal ni conversión a unidades absolutas de presión.

Sistemas embebidos, visualización e interacción. La arquitectura embebida permite coordinar la lectura secuencial de múltiples sensores, organizar las lecturas obtenidas, comunicar módulos y conservar la información de cada sesión. En este proyecto, la visualización se orientó a la revisión posterior mediante un reporte de sesión, más que a un tablero clínico en tiempo real. Desde la interacción humano-computador, se consideraron criterios de claridad, facilidad de interpretación y correspondencia con el flujo real de trabajo del personal tratante [10].

Consideraciones contextuales y normativas. El desarrollo del prototipo también se relaciona con aspectos de seguridad, higiene, protección de componentes, manejo de información y operación supervisada en población infantil. Aunque el sistema no corresponde a un dispositivo médico certificado, se tomaron como referencia buenas prácticas asociadas a seguridad eléctrica, documentación técnica, gestión de riesgos, limpieza y protección de datos.

2.4.3. Trabajos Relacionados

La medición instrumental del apoyo plantar en bipedestación se ha abordado desde tres frentes principales: literatura clínica sobre verticalización y rehabilitación pediátrica, soluciones comerciales de instrumentación plantar y desarrollos académicos orientados al sensado, adquisición y visualización de información asociada al apoyo plantar.

Enfoques clínicos y de rehabilitación. La evidencia sobre el uso de bipedestadores en población pediátrica con parálisis cerebral señala beneficios potenciales en funciones corporales, participación y bienestar psicosocial cuando la verticalización se integra a programas estructurados y supervisados [3]. De forma complementaria, la literatura de neurorrehabilitación resalta la importancia de la práctica específica de actividades motoras gruesas y del control postural durante el proceso terapéutico [1, 2].

Soluciones comerciales de instrumentación plantar. Sistemas comerciales como XSENSOR y plataformas orientadas a podología u ortopedia evidencian la disponibilidad de tecnologías para registrar y visualizar información del apoyo plantar mediante arreglos sensoriales y software especializado [5, 6]. Sin embargo, estas soluciones suelen estar orientadas a población adulta, deportista o clínica especializada, y pueden presentar barreras de adaptación al contexto terapéutico pediátrico, especialmente por costos, infraestructura, tallas pequeñas, tiempos de preparación y condiciones de bioseguridad.

Prototipos y desarrollos académicos. Diversos trabajos académicos aportan fundamentos sobre transducción, sensores piezorresistivos, acondicionamiento de señales y adquisición de datos en sistemas instrumentados [8, 9, 14]. Estos antecedentes son relevantes para el diseño de plataformas de sensado, aunque no necesariamente se enfocan en población pediátrica, bipedestación asistida o integración al flujo de trabajo terapéutico. En el ámbito institucional, también existen iniciativas relacionadas con prematuridad, tecnologías sanitarias y soluciones para población neonatal y

pediátrica, que evidencian interés local en el desarrollo de herramientas aplicadas a salud infantil [15, 16, 17, 18].

Antecedentes ortopédicos y biomecánicos. La literatura sobre malposiciones y malformaciones congénitas del pie infantil permite comprender que la anatomía, el crecimiento y las condiciones ortopédicas pueden modificar el patrón de apoyo plantar [7]. Esta perspectiva resulta pertinente para justificar que el prototipo no debe interpretarse como una herramienta diagnóstica, sino como un sistema de registro relativo y complementario para la revisión del apoyo durante sesiones supervisadas.

Síntesis crítica. Los antecedentes clínicos justifican la pertinencia de la bipedestación asistida, las soluciones comerciales demuestran la viabilidad de registrar información plantar mediante tecnología instrumentada y los desarrollos académicos aportan bases para el sensado y la adquisición de señales. El proyecto se ubicó en la intersección de estos frentes al desarrollar un prototipo funcional orientado al registro relativo del apoyo plantar infantil, integrado al flujo de sesión del centro terapéutico y limitado a la generación de información visual y numérica básica para revisión posterior.

Metodología de diseño y desarrollo

3.1. Proceso metodológico desarrollado

El desarrollo del prototipo se organizó mediante una metodología aplicada por etapas, orientada a pasar de la identificación de necesidades del entorno terapéutico a la construcción, integración y verificación funcional de una plataforma baropodométrica infantil. El proceso combinó actividades de levantamiento de requisitos, diseño mecánico, diseño electrónico, implementación de firmware, almacenamiento de información y pruebas técnicas, manteniendo como eje el registro relativo del apoyo plantar durante la bipedestación asistida.

Inicialmente, se revisaron las condiciones de uso del centro terapéutico, el flujo de trabajo del personal tratante y las características generales de la población objetivo. A partir de esta revisión se definieron requisitos clínicos, mecánicos, electrónicos, de software, almacenamiento, seguridad e higiene. Estos requisitos sirvieron como base para establecer la arquitectura general del sistema, conformada por la estructura tipo podoscopio, el cajón instrumentado, la cama de sensores FSR, la etapa electrónica de adquisición, los módulos de procesamiento y comunicación, la captura fotográfica, la memoria microSD y el reporte HTML de sesión.

Posteriormente, se diseñaron e implementaron los subsistemas principales del prototipo. En la etapa mecánica se definieron la estructura del podoscopio, el vidrio superior, el cajón inferior y la disposición física de las matrices de sensores. En la etapa electrónica se desarrolló la PCB de adquisición para integrar los sensores FSR, la multiplexación analógica, la alimentación y el módulo de procesamiento ESP32-S3. En la etapa de firmware y comunicación se implementaron las rutinas de lectura secuencial, organización de matrices, comunicación entre microcontroladores, captura fotográfica, almacenamiento local y generación del reporte HTML integrado, utilizando un ESP32-S3 como unidad lectora y un ESP32 receptor como unidad de captura, almacenamiento y visualización.

Finalmente, se realizaron pruebas funcionales orientadas a revisar la estabilidad estructural, la alimentación, la respuesta de sensores, la correspondencia entre sensor físico y visualización, la comunicación entre placas, la captura fotográfica, el almacenamiento en microSD y la generación del reporte de sesión. Adicionalmente, se realizó una revisión de usabilidad con personal tratante para valorar la claridad del flujo de operación y la pertinencia del prototipo como herramienta de apoyo para el registro y revisión posterior del apoyo plantar, sin reemplazar la valoración profesional.

3.2. Definición de requisitos del sistema

La definición de requisitos permitió establecer las condiciones clínicas, técnicas y operativas que debía cumplir la plataforma baropodométrica infantil para funcionar de manera segura, organizada y compatible con el entorno terapéutico. Estos requisitos orientaron las decisiones de diseño mecánico, selección de sensores, arquitectura electrónica, desarrollo de firmware, almacenamiento de información, visualización del reporte y operación supervisada del sistema.

Para organizar el proceso de diseño, los requisitos se agruparon en cinco categorías: clínicos y de uso, mecánicos y ergonómicos, electrónicos y de adquisición, software, visualización y almacenamiento, y seguridad, higiene y operación.

3.2.1. Requisitos clínicos y de uso

Los requisitos clínicos y de uso se definieron considerando que el sistema debía complementar la valoración observacional del apoyo plantar durante la bipedestación asistida, sin reemplazar el criterio del personal tratante. El prototipo debía ser utilizado únicamente bajo supervisión profesional y de acuerdo con la valoración previa del fisioterapeuta.

El flujo de uso se organizó en dos etapas: primero, la captura fotográfica de la huella plantar sobre el vidrio superior del podoscopio y, posteriormente, el registro relativo del apoyo sobre la cama de sensores ubicada en el cajón instrumentado. Para mantener la coherencia del registro, la captura fotográfica debía realizarse antes de habilitar la medición sobre sensores. Durante esta etapa, el usuario debía permanecer descalzo, sin calzado, férulas u ortesis, y cada pie debía ubicarse sobre la matriz correspondiente.

A partir de estas condiciones, el prototipo debía cumplir con los siguientes requisitos:

- Registrar información relativa del apoyo plantar durante la bipedestación asistida.
- Diferenciar la información correspondiente al pie izquierdo y al pie derecho.
- Permitir registros bilaterales, parciales o unilaterales, según la capacidad del usuario durante la sesión.
- Facilitar la ubicación manual o asistida de los pies sobre las matrices de sensores.
- Presentar la información de forma clara para su revisión posterior por parte del personal tratante.
- Conservar la información de cada sesión, asociando la captura fotográfica con las lecturas obtenidas sobre la cama de sensores.
- Mantener la interpretación de los registros como apoyo complementario a la valoración clínica.

3.2.2. Requisitos mecánicos y ergonómicos

Los requisitos mecánicos y ergonómicos se definieron a partir de la necesidad de integrar una estructura tipo podoscopio con una zona superior de captura y una zona inferior de registro sobre sensores, manteniendo condiciones de estabilidad, seguridad y facilidad de uso para población infantil bajo supervisión profesional. Para ello, el prototipo debía cumplir con los siguientes requisitos:

- Contar con una superficie superior estable para la captura fotográfica de la huella plantar.
- Incorporar un cajón inferior extraíble para alojar la cama de sensores y permitir el registro posterior del apoyo plantar.
- Mantener rigidez y estabilidad durante la bipedestación asistida, evitando desplazamientos, inclinaciones o deformaciones visibles.
- Soportar una carga estructural superior a la esperada en la población objetivo, considerando un margen de seguridad durante el uso supervisado.
- Proteger internamente el cableado, la electrónica de adquisición y los módulos auxiliares del sistema.
- Tener dimensiones compatibles con la escala infantil, el espacio terapéutico y la ubicación de ambos pies sobre las zonas de registro.
- Permitir acceso a los componentes internos para revisión, mantenimiento o ajuste.

3.2.3. Requisitos electrónicos y de adquisición

Los requisitos electrónicos y de adquisición se definieron considerando la necesidad de leer 80 sensores FSR distribuidos en dos matrices independientes. El sistema debía centralizar las conexiones, reducir la cantidad de entradas analógicas requeridas y conservar la correspondencia entre la ubicación física de cada sensor, su canal de lectura y su representación visual. Para ello, el prototipo debía cumplir con los siguientes requisitos:

- Integrar una etapa electrónica de adquisición para centralizar la conexión de los sensores FSR.
- Organizar los 80 sensores en dos matrices independientes de 40 sensores, correspondientes al pie izquierdo y al pie derecho.
- Implementar una etapa de multiplexación analógica para realizar la lectura secuencial de los canales de sensado.
- Emplear una unidad de procesamiento embebida para controlar la lectura de sensores y organizar la información obtenida.

- Mantener una alimentación estable para los sensores, la etapa de adquisición y los módulos auxiliares del sistema.
- Permitir pruebas progresivas por sensores individuales, grupos de sensores y matrices completas.
- Conservar la trazabilidad entre la ubicación física del sensor, su conexión electrónica y su posición en el reporte generado.

3.2.4. Requisitos de software, visualización y almacenamiento

Los requisitos de software, visualización y almacenamiento se definieron para asegurar que las lecturas obtenidas pudieran organizarse, asociarse a una sesión y conservarse en un formato de consulta posterior. El sistema debía cumplir con los siguientes requisitos:

- Controlar la lectura secuencial de los sensores mediante la selección de canales en la etapa de multiplexación.
- Organizar las lecturas de acuerdo con la distribución física de las matrices izquierda y derecha.
- Habilitar el registro sobre sensores únicamente después de realizar la captura fotográfica de la huella plantar.
- Representar las lecturas mediante una visualización matricial de fácil interpretación.
- Almacenar la información de cada sesión en memoria local.
- Asociar las lecturas obtenidas con la captura fotográfica correspondiente a la sesión.
- Generar un reporte integrado que permitiera revisar la fotografía, los valores registrados y la representación visual de las matrices.

3.2.5. Requisitos de seguridad, higiene y operación

Los requisitos de seguridad, higiene y operación se definieron considerando que el sistema está orientado a población infantil y a un entorno terapéutico supervisado. Por tanto, el prototipo debía cumplir con los siguientes requisitos:

- Evitar el contacto directo del usuario con componentes electrónicos, conexiones internas o puntos conductores expuestos.
- Mantener protegida la etapa de alimentación y aislar adecuadamente las conexiones internas del sistema.
- Operar la electrónica de control y adquisición con niveles de tensión compatibles con sistemas embebidos.

- Utilizar una única conexión externa de alimentación para energizar el prototipo completo y reducir cables expuestos durante la operación.
- Permitir la limpieza de las superficies de contacto antes y después de cada uso.
- Mantener una operación sencilla y supervisada por el personal tratante.
- Requerir acompañamiento profesional durante todo el proceso de captura fotográfica y medición sobre sensores.

Diseño e implementación

4.1. Arquitectura general de la solución propuesta

La arquitectura general de la solución se planteó como un podoscopio instrumentado para el registro del apoyo plantar infantil durante la bipedestación asistida. El sistema integra una estructura física, un cajón inferior instrumentado, un subsistema de sensado plantar, una etapa electrónica de adquisición, una unidad de procesamiento para la lectura de señales, una unidad receptora para captura y almacenamiento, y un reporte integrado para la revisión posterior de la sesión.

La Figura 4.1 presenta el contexto general del sistema, identificando el actor externo, las entradas principales y las salidas generadas durante una sesión de valoración.

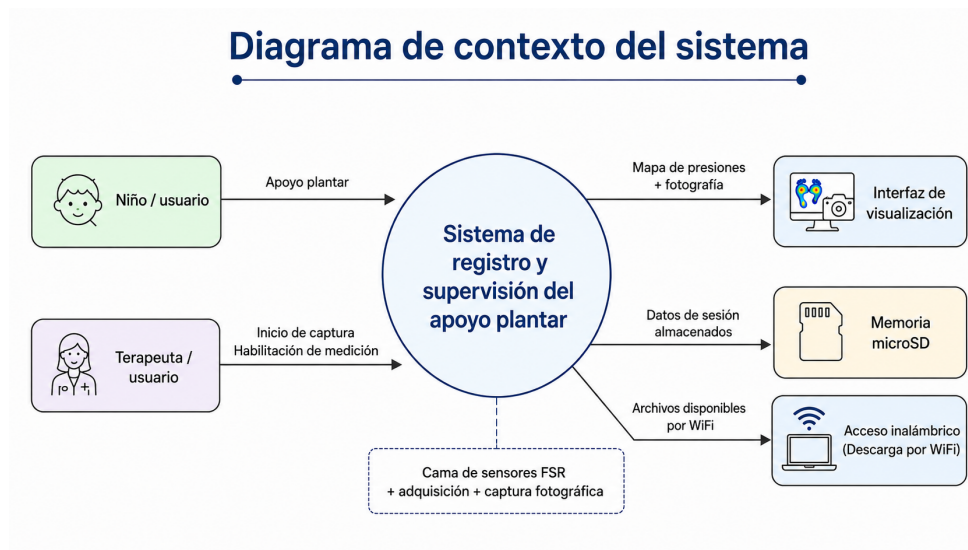


Figura 4.1: Diagrama de contexto del sistema de registro y supervisión del apoyo plantar.

El objetivo de esta arquitectura es asociar dos tipos de información complementaria: la captura fotográfica de la huella plantar y las lecturas relativas obtenidas desde la superficie instrumentada de sensado. Esta relación permite conservar un registro organizado por sesión, manteniendo la trazabilidad entre la referencia visual, las lecturas obtenidas y la visualización generada por el sistema.

La solución se compone de siete bloques funcionales principales: estructura física del podoscopio, cajón inferior de alojamiento, subsistema de sensado plantar, etapa electrónica de adquisición, uni-

dad de procesamiento para lectura de sensores, unidad receptora para captura y almacenamiento, y módulo de visualización mediante reporte de sesión. La relación general entre los bloques mecánicos, electrónicos, de almacenamiento y visualización se presenta en la Figura 4.2.

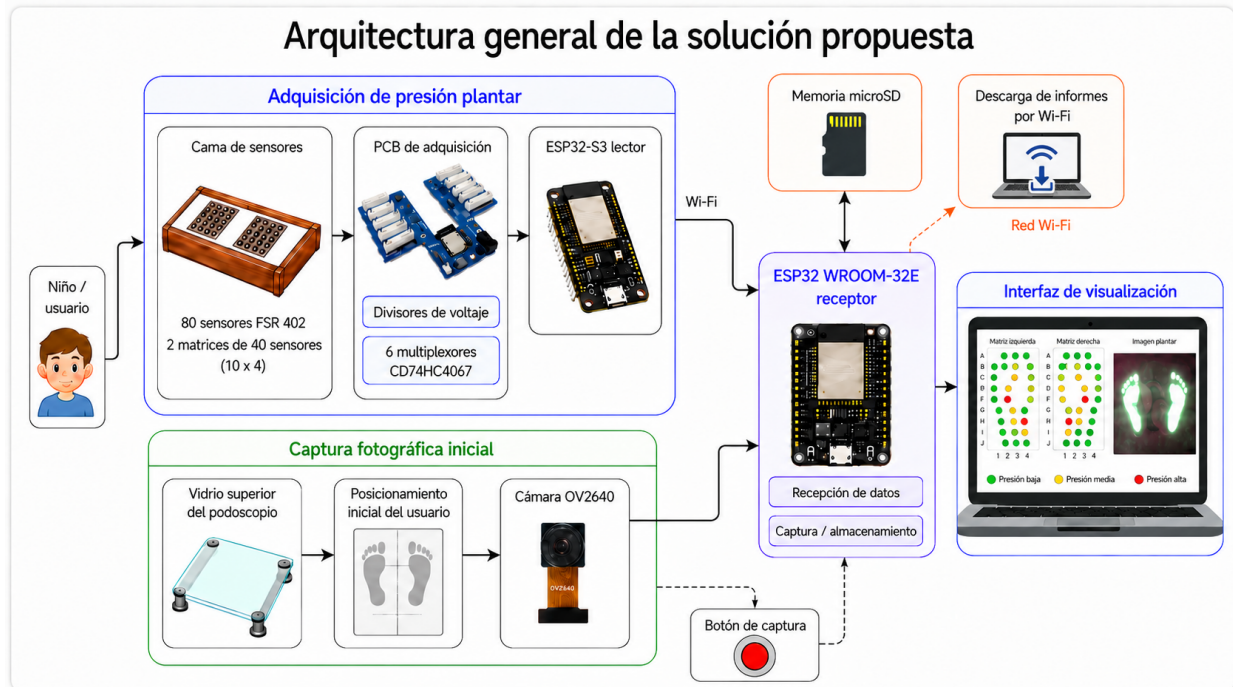


Figura 4.2: Arquitectura general de la solución propuesta, integrando adquisición de lecturas FSR, captura fotográfica, recepción, almacenamiento local, descarga inalámbrica y visualización.

En esta arquitectura, la cama de sensores se organiza en dos matrices independientes de 40 sensores, correspondientes al pie izquierdo y al pie derecho. Las señales provenientes de los sensores se centralizan en la PCB de adquisición, donde una etapa de multiplexación permite seleccionar secuencialmente los canales de lectura y reducir la cantidad de entradas analógicas requeridas.

El ESP32-S3 controla la adquisición de las señales provenientes de los sensores y organiza las lecturas de acuerdo con la distribución física de la cama de sensado. Posteriormente, estas lecturas se transmiten al ESP32 receptor, el cual las asocia con la captura fotográfica de la huella plantar y las almacena en una tarjeta microSD. Como salida principal, el sistema genera un reporte HTML integrado que permite revisar la imagen de la huella plantar y la distribución relativa del apoyo en ambas matrices. Adicionalmente, el ESP32 receptor habilita una red Wi-Fi local en modo Access Point, a la cual se conecta el computador para descargar el informe sin requerir acceso a Internet.

Como criterio de control, el sistema requiere que la captura fotográfica de la huella plantar se realice antes de habilitar el registro sobre sensores. Esta condición evita generar sesiones incompletas y asegura que las lecturas almacenadas queden asociadas a una referencia visual de la sesión.

Aunque la captura fotográfica y la adquisición de sensores no se realizan de manera simultá-

nea ni sobre la misma superficie, ambas etapas forman parte de una misma secuencia supervisada. La fotografía se utiliza como referencia visual de la huella plantar, mientras que los sensores FSR aportan información relativa sobre el apoyo registrado posteriormente en la cama de sensores. Esta separación responde a decisiones técnicas de integración y al alcance funcional del prototipo, manteniendo una lógica de operación coherente con el flujo terapéutico propuesto.

En conjunto, la arquitectura integra los componentes mecánicos, electrónicos y de visualización necesarios para obtener un registro organizado del apoyo plantar. En la sección siguiente se presentan los criterios utilizados para seleccionar los componentes principales del prototipo. Posteriormente, se desarrolla con mayor detalle el diseño mecánico, la cama de sensores, la PCB de adquisición, la unidad receptora, la alimentación, el firmware y la visualización de los resultados.

4.2. Selección y justificación de los componentes principales

La selección de los componentes electrónicos y eléctricos del prototipo se realizó a partir de los requerimientos funcionales establecidos para el sistema. Entre estos se consideraron la adquisición de 80 puntos de sensado, la captura de una imagen de referencia del apoyo plantar, el almacenamiento local de la información, la comunicación inalámbrica entre las unidades de procesamiento, la generación y descarga del informe, la iluminación del vidrio superior y la alimentación de todos los módulos desde una entrada común.

El proceso de selección también consideró la compatibilidad eléctrica entre los componentes, la cantidad de entradas y salidas requeridas, la facilidad de integración dentro de la estructura, la disponibilidad de los dispositivos, la posibilidad de realizar mantenimiento y la necesidad de conservar una arquitectura compacta. A partir de estos criterios, el sistema electrónico se dividió en tres grupos principales: la unidad de adquisición de sensores, la unidad receptora de captura y almacenamiento, y la etapa general de alimentación, protección e iluminación.

4.2.1. Componentes de la unidad de adquisición

La unidad de adquisición se diseñó para recibir, acondicionar y procesar las señales provenientes de los 80 sensores instalados en la cama de sensado. Para esta función se seleccionaron sensores FSR 402, un módulo ESP32-S3-WROOM-1-N16R8, seis multiplexores analógicos CD74HC4067PWR y los componentes pasivos y de conexión necesarios para integrar todos los puntos de lectura en una sola PCB.

La selección del sensor FSR 402 se realizó después de comparar diferentes tecnologías de medición de fuerza y presión, entre ellas celdas de carga, sensores FlexiForce, sensores piezoeléctricos y matrices comerciales. Como resultado de este análisis, el FSR 402 se consideró compatible con la cantidad de puntos requerida, el espacio disponible en el cajón y la arquitectura de lectura propuesta. El proceso completo de comparación, las características del dispositivo y las limitaciones asociadas con su respuesta no lineal se presentan en la Subsección 4.4.1.

Para el procesamiento de las señales se seleccionó el módulo ESP32-S3-WROOM-1-N16R8. Este dispositivo proporciona los recursos de procesamiento, memoria, entradas analógicas, pines de pro-

pósito general y conectividad inalámbrica necesarios para controlar la adquisición de los sensores y transmitir la información hacia la unidad receptora [19]. La configuración utilizada incorpora 16 MB de memoria flash y 8 MB de memoria PSRAM, proporcionando capacidad suficiente para ejecutar la lectura secuencial de los canales, aplicar los filtros definidos en el firmware y organizar las dos matrices de sensado.

Debido a que la cantidad de sensores supera el número de entradas analógicas disponibles para una conexión directa, se seleccionaron seis multiplexores CD74HC4067PWR. Cada dispositivo permite seleccionar uno de 16 canales analógicos mediante cuatro líneas digitales de dirección [20]. La capacidad total disponible se obtiene mediante:

$$6 \times 16 = 96 \text{ canales.} \quad (4.1)$$

De estos 96 canales, se utilizan 80 para los sensores FSR. Se asignaron tres multiplexores a cada matriz de 40 sensores, lo que permitió conservar una distribución simétrica entre el pie izquierdo y el pie derecho y simplificar el enrutamiento de la PCB.

Para realizar la conexión desmontable entre la cama de sensores y la PCB se seleccionaron diez conectores JST-XH de diez pines. Cada conector agrupa las señales correspondientes a ocho sensores y sus líneas eléctricas asociadas. Esta disposición permite organizar los 80 puntos en diez grupos, mantener la correspondencia entre la posición física y el canal electrónico y facilitar las tareas de montaje, diagnóstico y mantenimiento.

Cada sensor se incorporó en un divisor de voltaje con una resistencia fija de 10 kΩ. El mismo valor se utilizó en todos los canales para conservar una configuración eléctrica uniforme. Aunque esta igualdad no elimina la variabilidad propia de los FSR, permite mantener el mismo principio de conversión resistencia-voltaje en los 80 puntos de lectura.

La estabilidad de la alimentación de la PCB se reforzó mediante capacitores de desacoplamiento de 100 nF ubicados cerca de los circuitos integrados, capacitores de 10 μF distribuidos en diferentes zonas de alimentación y un capacitor de 47 μF en la entrada principal. Los capacitores de menor valor contribuyen a reducir perturbaciones de alta frecuencia, mientras que los de mayor capacidad ayudan a estabilizar la tensión ante variaciones transitorias de corriente.

Para obtener los niveles de tensión requeridos por la PCB se incorporó un regulador AMS1117, acompañado por los elementos de filtrado correspondientes [21]. También se incluyó un diodo Schottky SS34 en la entrada de alimentación como elemento de conducción y protección, aprovechando su baja caída de tensión directa [22].

La alimentación externa de la unidad de adquisición se realiza mediante un conector jack DC hembra. Adicionalmente, la PCB incorpora un puerto microUSB destinado a la programación y depuración del ESP32-S3, junto con dos pulsadores para las funciones de reinicio y habilitación.

La PCB también incorpora dos LED propios para facilitar la verificación local de la placa durante la energización, programación y ejecución de pruebas. Estos dos LED forman parte de la unidad de adquisición y no corresponden a los indicadores externos rojo y azul utilizados para guiar al terapeuta durante la sesión.

El Cuadro 4.1 resume los componentes principales seleccionados para la unidad de adquisición.

Cuadro 4.1: Componentes principales seleccionados para la unidad de adquisición.

Componente	Cantidad	Criterio de selección y función dentro del sistema
Sensor FSR 402	80	Elemento resistivo seleccionado para registrar la distribución relativa del apoyo plantar en las dos matrices.
ESP32-S3-WROOM-1-N16R8	1	Unidad encargada del procesamiento, control de los multiplexores, adquisición analógica y transmisión de las lecturas.
CD74HC4067PWR	6	Multiplexores analógicos de 16 canales empleados para integrar los 80 sensores utilizando seis entradas analógicas del microcontrolador.
Conectores JST-XH de 10 pines	10	Conexión desmontable y organizada de los sensores correspondientes a las matrices izquierda y derecha.
Resistencias de 10 k Ω	80	Resistencias de referencia utilizadas en los divisores de voltaje de los sensores FSR.
Capacitores de 100 nF	16	Desacoplamiento local de la alimentación de los circuitos integrados.
Capacitores de 10 μ F	4	Filtrado y estabilización de las líneas de alimentación en diferentes zonas de la PCB.
Capacitor de 47 μ F	1	Filtrado principal de la entrada de alimentación.
Regulador AMS1117	1	Regulación local de la tensión requerida por los circuitos de la PCB.
Diodo Schottky SS34	1	Elemento de conducción y protección incorporado en la entrada de alimentación.
Conector jack DC hembra	1	Entrada desmontable de 5 V para la alimentación de la PCB de adquisición.
Puerto microUSB	1	Interfaz utilizada para la programación y depuración del ESP32-S3.
Pulsadores de reinicio y habilitación	2	Control manual de las funciones básicas del microcontrolador durante programación y pruebas.
LED integrados en la PCB	2	Indicadores locales utilizados para verificar la energización y el funcionamiento básico de la unidad de adquisición. No corresponden a los indicadores externos de la sesión.

4.2.2. Componentes de la unidad receptora, captura y almacenamiento

La segunda unidad electrónica del sistema se implementó mediante un kit de cámara de Sun-Founder basado en un módulo ESP32-WROOM-32E. Esta plataforma se seleccionó porque permite integrar en una misma unidad la recepción inalámbrica de datos, el control de la cámara, el alma-

cenamiento en tarjeta microSD, la creación del informe HTML y la habilitación del servidor web local.

El módulo ESP32-WROOM-32E se utiliza como controlador principal de la sesión. Sus funciones incluyen crear la red Wi-Fi local, recibir las lecturas enviadas por el ESP32-S3, controlar la secuencia de captura y medición, almacenar la información y habilitar la descarga del último informe desde un computador.

Para la captura fotográfica se utilizó una cámara OV2640 compatible con la placa de SunFounder. Esta cámara permite obtener una imagen de referencia de la huella plantar cuando el usuario se encuentra sobre el vidrio superior iluminado. La fotografía se conserva junto con las lecturas de los sensores para mantener la trazabilidad de cada sesión.

La interfaz para tarjeta microSD incluida en la unidad receptora se utilizó como medio de almacenamiento principal. En esta memoria se guardan las fotografías, los datos procesados y los informes HTML generados. La selección de un almacenamiento local permite conservar la información sin depender de una conexión permanente a Internet.

La interacción física con el sistema se realiza mediante un pulsador externo de captura y dos LED externos de estado. El pulsador permite que el terapeuta inicie la captura fotográfica y la secuencia de medición. El LED rojo indica el estado previo a la captura, mientras que el LED azul indica que la captura fue realizada y que la medición sobre la cama de sensores se encuentra habilitada.

Los dos LED externos son independientes de los dos LED incorporados en la PCB de adquisición. Los LED de la PCB se utilizan para verificaciones locales de la placa, mientras que los indicadores externos forman parte de la interfaz de operación utilizada durante la sesión.

La unidad receptora se alimenta mediante un cable microUSB conectado a la salida de 5 V de la fuente general del prototipo.

El Cuadro 4.2 presenta los componentes principales seleccionados para esta unidad.

Cuadro 4.2: Componentes principales seleccionados para la unidad receptora, captura y almacenamiento.

Componente	Cantidad	Criterio de selección y función dentro del sistema
Kit SunFounder basado en ESP32-WROOM-32E	1	Plataforma receptora utilizada para integrar comunicación Wi-Fi, control de sesión, almacenamiento y generación del informe.
Cámara OV2640	1	Captura de la imagen de referencia de la huella plantar sobre el vidrio superior.
Interfaz para tarjeta microSD	1	Conexión de la memoria utilizada para almacenar fotografías, lecturas e informes.
Tarjeta microSD	1	Medio principal de almacenamiento local del sistema.
Pulsador externo de captura	1	Inicio manual de la captura fotográfica y de la secuencia supervisada de medición.
LED externos de estado	2	Indicadores rojo y azul utilizados para comunicar al terapeuta las etapas principales de la sesión.
Cable microUSB	1	Alimentación de 5 V para la unidad receptora.

4.2.3. Componentes de alimentación, protección e iluminación

La alimentación general del prototipo se diseñó a partir de una entrada desmontable de 120 V AC. Esta etapa se conformó por un cable de alimentación, un conector de entrada instalado en el panel, un interruptor general de encendido y apagado y un fusible de protección de 0,5 A ubicado sobre la línea de fase.

Después del interruptor y del fusible, la alimentación se distribuye en paralelo hacia la tira LED de 120 V AC y hacia los terminales de entrada AC del módulo convertidor. De esta forma, la apertura del interruptor o del fusible desenergiza tanto la iluminación interna como las unidades electrónicas del prototipo.

El cable desmontable facilita el transporte y almacenamiento del prototipo, mientras que el conector de panel proporciona una interfaz fija entre la alimentación externa y el cableado interno. El interruptor general permite controlar desde un único punto la energización completa del sistema. El fusible de 0,5 A se incorporó en la línea de fase antes de la distribución interna como elemento de protección ante condiciones de sobrecorriente.

Después de la etapa de entrada, protección y encendido, la alimentación de 120 V AC se distribuye hacia dos ramas. La primera alimenta directamente una tira LED de 120 V AC, mientras que la segunda se conecta a los terminales de entrada de un módulo convertidor AC-DC con salida regulada de 5 V DC y capacidad máxima de 3,4 A.

La tira LED, con una longitud aproximada de un metro, se seleccionó para iluminar el vidrio superior y mejorar la visibilidad de la huella plantar durante la captura fotográfica. Debido a que está diseñada para operar con 120 V AC, se conecta directamente a la rama de alimentación de red, después del interruptor general y del fusible de protección.

El módulo convertidor recibe la alimentación de 120 V AC y proporciona una salida regulada de 5 V DC, utilizada para alimentar simultáneamente la unidad de adquisición y la unidad receptora. Su capacidad máxima de salida es de 3,4 A; este valor corresponde a la corriente máxima que puede suministrar el dispositivo y no a la corriente consumida permanentemente por el prototipo. La verificación del consumo del sistema y de las condiciones de operación de la etapa de alimentación se presenta posteriormente en el capítulo de pruebas.

La salida de 5 V DC del módulo convertidor se divide en dos conexiones independientes. La unidad receptora se alimenta mediante un cable microUSB, mientras que la PCB de adquisición se alimenta mediante un cable terminado en conector jack macho, acoplado al conector jack hembra incorporado en la placa. Ambas unidades comparten la referencia de 0 V o GND proporcionada por la salida del módulo convertidor.

El Cuadro 4.3 resume los componentes seleccionados para la etapa de alimentación, protección e iluminación.

Cuadro 4.3: Componentes principales seleccionados para la alimentación, protección e iluminación del prototipo.

Componente	Cantidad	Criterio de selección y función dentro del sistema
Cable de alimentación de 120 V AC	1	Conexión desmontable del prototipo a la red eléctrica.
Conector de entrada de panel	1	Interfaz fija entre el cable externo y la distribución eléctrica interna.
Interruptor general	1	Control del encendido y apagado completo del sistema.
Fusible general de 0.5 A	1	Protección de la alimentación ante condiciones de sobrecorriente.
Portafusible	1	Alojamiento del fusible y posibilidad de sustitución durante mantenimiento.
Módulo rectificador y convertidor AC-DC de 5 V y 3,4 A máximo	1	Conversión de la entrada de 120 V AC en una salida regulada de 5 V DC para alimentar simultáneamente la unidad de adquisición y la unidad receptora.
Tira LED de 120 V AC y 1 m	1	Iluminación del vidrio superior durante la captura fotográfica.
Cable con conector jack macho	1	Alimentación de 5 V para la PCB de adquisición.
Cable microUSB	1	Alimentación de 5 V para la unidad receptora.
Conductores y elementos de derivación	Según montaje	Distribución de las líneas AC y DC hacia los diferentes subsistemas del prototipo.

En las secciones siguientes se describe la forma en que estos componentes fueron integrados en el diseño mecánico, la cama de sensores, la PCB de adquisición, la unidad receptora, la etapa de

alimentación y el firmware del prototipo.

4.2.4. Estimación económica del prototipo y comparación con sistemas comerciales

La estimación económica del prototipo se realizó considerando los componentes electrónicos, materiales, elementos mecánicos, actividades de fabricación y trabajos de integración requeridos para obtener el sistema funcional. El análisis diferencia los costos que representaron un desembolso monetario directo de aquellos correspondientes a materiales disponibles previamente, aportes institucionales o labores realizadas por los autores.

La madera MDF utilizada para construir la estructura se encontraba disponible antes del desarrollo del proyecto, por lo que no representó una compra directa. De igual manera, el módulo AC-DC de 5 V y 3,4 A, los conectores jack y el cable microUSB ya estaban disponibles. Sin embargo, sus valores fueron incluidos en la estimación para representar de manera más completa el costo de los elementos empleados durante la construcción del prototipo.

La cama de sensado se conformó por un total de 80 sensores FSR. De esta cantidad, 70 sensores fueron adquiridos durante la ejecución del proyecto, mientras que los 10 sensores restantes fueron donados por la Pontificia Universidad Javeriana Cali. En consecuencia, el costo presentado para los sensores FSR corresponde exclusivamente a las 70 unidades adquiridas y no incluye un valor monetario imputado para los sensores recibidos como aporte institucional.

La integración electrónica de la PCB y el montaje de la etapa de potencia eléctrica fueron realizados por los autores, por lo que tampoco representaron el pago de mano de obra externa. No obstante, estas actividades fueron valoradas económicamente e incorporadas como costos imputados. La mano de obra de carpintería sí correspondió a un servicio requerido para la fabricación y adecuación de la estructura.

El Cuadro 4.4 presenta el valor económico de los materiales, componentes y actividades consideradas. Para facilitar futuras comparaciones internacionales, los valores también se expresan en dólares estadounidenses, utilizando una tasa de conversión de referencia de 1 USD = 3.300 COP. Esta tasa fue adoptada únicamente para el presente análisis y no corresponde necesariamente al valor de mercado vigente en fechas posteriores.

Cuadro 4.4: Estimación económica de los componentes, materiales y actividades del prototipo.

Concepto	Condición	Costo (COP)	Costo (USD)
Pintura del podoscopio	Desembolso directo	\$250.000	US\$75,76
Cable de datos	Desembolso directo	\$19.000	US\$5,76
Seis multiplexores CD74HC4067	Desembolso directo	\$45.000	US\$13,64
Vidrio y sistema de iluminación LED	Desembolso directo	\$35.000	US\$10,61
Fabricación de la PCB de adquisición	Desembolso directo	\$150.000	US\$45,45
Componentes electrónicos de la PCB	Desembolso directo	\$121.700	US\$36,88

Continúa en la página siguiente.

Cuadro 4.4 – continuación

Concepto	Condición	Costo (COP)	Costo (USD)
ESP32 receptor con cámara	Desembolso directo	\$148.589	US\$45,03
Setenta sensores FSR adquiridos	Desembolso directo	\$1.761.000	US\$533,64
Diez sensores FSR	Donación de la Universidad	\$0	US\$0,00
Tarjeta microSD	Desembolso directo	\$30.000	US\$9,09
Madera MDF	Material disponible previamente	\$150.000	US\$45,45
Fusible	Desembolso directo	\$1.000	US\$0,30
Tornillería, adhesivos, silicona y otros consumibles	Desembolso directo	\$100.000	US\$30,30
Interruptor y conector de entrada	Desembolso directo	\$14.000	US\$4,24
Conductores, conectores jack y cable microUSB	Partida mixta; algunos elementos disponibles	\$20.000	US\$6,06
Módulo AC-DC de 5 V y 3,4 A	Elemento disponible previamente	\$20.000	US\$6,06
Botón de captura y LED indicadores	Desembolso directo	\$4.000	US\$1,21
Mano de obra de carpintería	Servicio externo de fabricación	\$300.000	US\$90,91
Mano de obra electrónica de la PCB	Trabajo realizado por los autores	\$150.000	US\$45,45
Mano de obra de potencia eléctrica	Trabajo realizado por los autores	\$100.000	US\$30,30
Valor económico estimado total	Costos directos e imputados	\$3.419.289	US\$1.036,15

El valor económico estimado del prototipo fue de \$3.419.289 COP, equivalente aproximadamente a US\$1.036,15 con la tasa de conversión adoptada. Esta cifra incluye tanto los desembolsos monetarios como el valor estimado de los materiales disponibles previamente y de las labores técnicas realizadas por los autores. El valor de los 10 sensores FSR donados por la Universidad no fue incorporado al total, debido a que estos elementos no representaron un desembolso durante la ejecución del proyecto y no se les asignó un costo imputado independiente.

El desembolso efectivo fue inferior al valor económico total debido a que no fue necesario adquirir la madera MDF, el módulo AC-DC, los conectores jack ni el cable microUSB. Asimismo, 10 de los 80 sensores FSR fueron suministrados mediante una donación institucional. Tampoco se contrató externamente la integración electrónica de la PCB ni el montaje de la etapa de potencia. Esta diferencia permite distinguir entre el dinero requerido durante la ejecución del proyecto y el valor económico contabilizado de los materiales, componentes y actividades empleadas en su desarrollo.

La adquisición de 70 de los 80 sensores FSR constituyó el componente con mayor participación en el presupuesto, con un valor de \$1.761.000 COP. Los 10 sensores restantes, aunque forman parte

de la cama de sensado, no representaron un costo directo debido a que fueron donados por la Universidad. La participación del costo de los sensores adquiridos dentro del valor económico total se calculó mediante:

$$P_{\text{FSR}} = \frac{1,761,000}{3,419,289} \times 100 \approx 51,5 \%. \quad (4.2)$$

Por tanto, aproximadamente la mitad del valor económico contabilizado del prototipo correspondió a la adquisición de los sensores FSR. Este resultado evidencia que la cantidad de puntos de sensado constituye el principal factor económico de la solución desarrollada, aun cuando una parte de los sensores fue obtenida mediante un aporte institucional.

La Figura 4.3 presenta los precios consultados para diferentes plataformas y sistemas relacionados con el registro o análisis del apoyo plantar. Estos valores permiten contextualizar económicamente el prototipo frente a soluciones disponibles comercialmente.

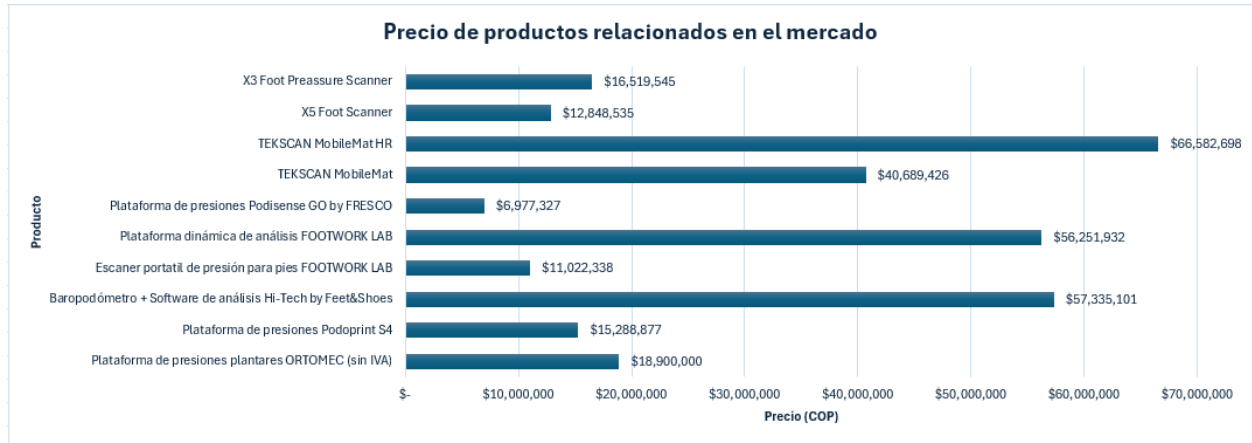


Figura 4.3: Comparación de precios de sistemas comerciales relacionados con el registro o análisis del apoyo plantar. Los valores se presentan en pesos colombianos.

El sistema comercial de menor precio incluido en la comparación corresponde a la plataforma Podisense GO by FRESCO, con un valor de \$6.977.327 COP. Al comparar esta referencia con el valor económico estimado del prototipo, la diferencia se calculó mediante:

$$D_{\text{menor}} = 6,977,327 - 3,419,289 = 3,558,038 \text{ COP}. \quad (4.3)$$

La reducción porcentual respecto a esta referencia fue:

$$R_{\text{menor}} = \frac{6,977,327 - 3,419,289}{6,977,327} \times 100 \approx 51,0 \%. \quad (4.4)$$

Por tanto, el valor económico estimado del prototipo fue aproximadamente un 51,0 % inferior al sistema comercial de menor precio considerado. Expresado como relación, esta referencia comercial presentó un precio aproximadamente 2,04 veces superior al valor del prototipo.

El sistema de mayor precio incluido en la comparación corresponde al TEKSCAN MobileMat HR, con un valor de \$66.582.698 COP. En este caso, la diferencia respecto al prototipo fue:

$$D_{\text{mayor}} = 66,582,698 - 3,419,289 = 63,163,409 \text{ COP.} \quad (4.5)$$

La reducción porcentual correspondiente fue:

$$R_{\text{mayor}} = \frac{66,582,698 - 3,419,289}{66,582,698} \times 100 \approx 94,9 \%. \quad (4.6)$$

De esta manera, las referencias comerciales consideradas presentaron precios entre aproximadamente 2,04 y 19,47 veces superiores al valor económico estimado del prototipo. Estos resultados permiten caracterizar la solución desarrollada como una alternativa de costo reducido dentro del alcance funcional definido para el proyecto.

No obstante, la comparación presentada es exclusivamente económica y no implica equivalencia directa entre el prototipo y los sistemas comerciales. Algunos de estos equipos incorporan una mayor densidad de sensores, calibración metrológica, medición absoluta de presión, certificaciones, software especializado, garantía y funciones de análisis clínico que no forman parte del alcance de la plataforma desarrollada. El prototipo se orientó al registro relativo del apoyo plantar, a la conservación organizada de las sesiones y a su integración al contexto operativo del centro terapéutico.

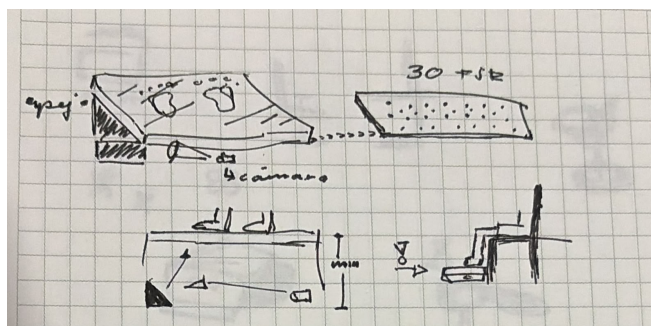
4.3. Diseño mecánico del podoscopio

El diseño mecánico del prototipo se desarrolló a partir de una estructura tipo podoscopio, orientada a integrar la superficie superior de apoyo, el alojamiento interno de componentes y un cajón inferior instrumentado para la ubicación de la cama de sensores. Esta configuración permite organizar físicamente los elementos del sistema y separar la zona de captura fotográfica inicial de la zona destinada al registro del apoyo plantar.

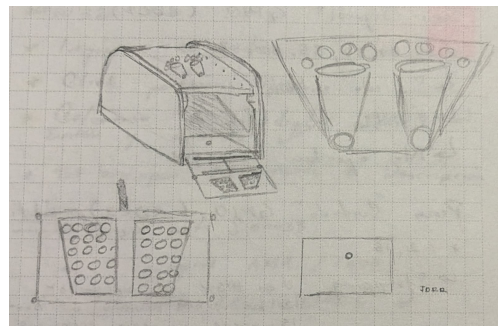
El podoscopio fue construido como una estructura rectangular en madera MDF laminada, con una superficie superior de vidrio, una cavidad interna para los componentes de captura y almacenamiento, y un cajón inferior extraíble donde se alojan las matrices de sensores FSR. La selección de esta configuración respondió a la necesidad de contar con una estructura estable, compacta, accesible para montaje y adecuada para uso supervisado con población infantil durante bipedestación asistida.

4.3.1. Aproximación inicial del diseño

Antes de definir el modelo tridimensional y las dimensiones finales, se realizaron bocetos preliminares para explorar la forma general de la estructura, la ubicación del vidrio superior, el cajón extraíble y la disposición inicial de las matrices de sensores. Esta etapa permitió validar la relación espacial entre la superficie de apoyo, el espacio interno del podoscopio y la zona inferior destinada al registro del apoyo plantar.



(a) Exploración inicial de la estructura y cajón extraíble.



(b) Aproximación a la ubicación de las matrices de sensores.

Figura 4.4: Bocetos preliminares utilizados para la aproximación inicial del diseño mecánico del podoscopio.

4.3.2. Estructura general y distribución mecánica

La estructura principal del podoscopio corresponde a un cuerpo tipo gabinete, abierto en su zona frontal, con dimensiones generales de 33.0 cm de ancho, 25.5 cm de profundidad y 41.3 cm de altura. Esta configuración permite alojar la plataforma interna, la cámara, el cableado, los módulos electrónicos y el cajón inferior, manteniendo acceso visual y técnico durante el montaje, verificación y mantenimiento del prototipo.

En la parte superior se ubicó una lámina de vidrio de aproximadamente 29.0 cm por 23.0 cm y 1.0 cm de espesor. Esta superficie permite el apoyo inicial del usuario durante la captura fotográfica de la huella plantar. El vidrio se apoya sobre un marco de madera, lo que contribuye a mantenerlo fijo dentro de la estructura, facilita la limpieza superficial antes y después de cada sesión y evita el contacto directo del usuario con bordes internos o elementos electrónicos del sistema.

El cajón inferior fue incorporado como el elemento mecánico encargado de alojar la cama de sensores. Tiene una altura aproximada de 5.0 cm, un ancho de 29.5 cm y una longitud de salida de 24.0 cm. Su condición extraíble permite desplazar la zona de sensado hacia el exterior para realizar la medición, facilitar el acceso a las matrices y proteger el cableado asociado durante la operación del sistema.

Sobre la superficie del cajón se ubicaron dos matrices independientes de sensores, una para cada pie. Cada matriz está formada por 40 sensores distribuidos en 10 filas y 4 columnas, con dimensiones aproximadas de 7.2 cm por 18.0 cm y una separación aproximada de 6.0 cm entre matrices. Esta disposición permite diferenciar físicamente el apoyo izquierdo y derecho, manteniendo una ubicación compatible con la bipedestación asistida del usuario.

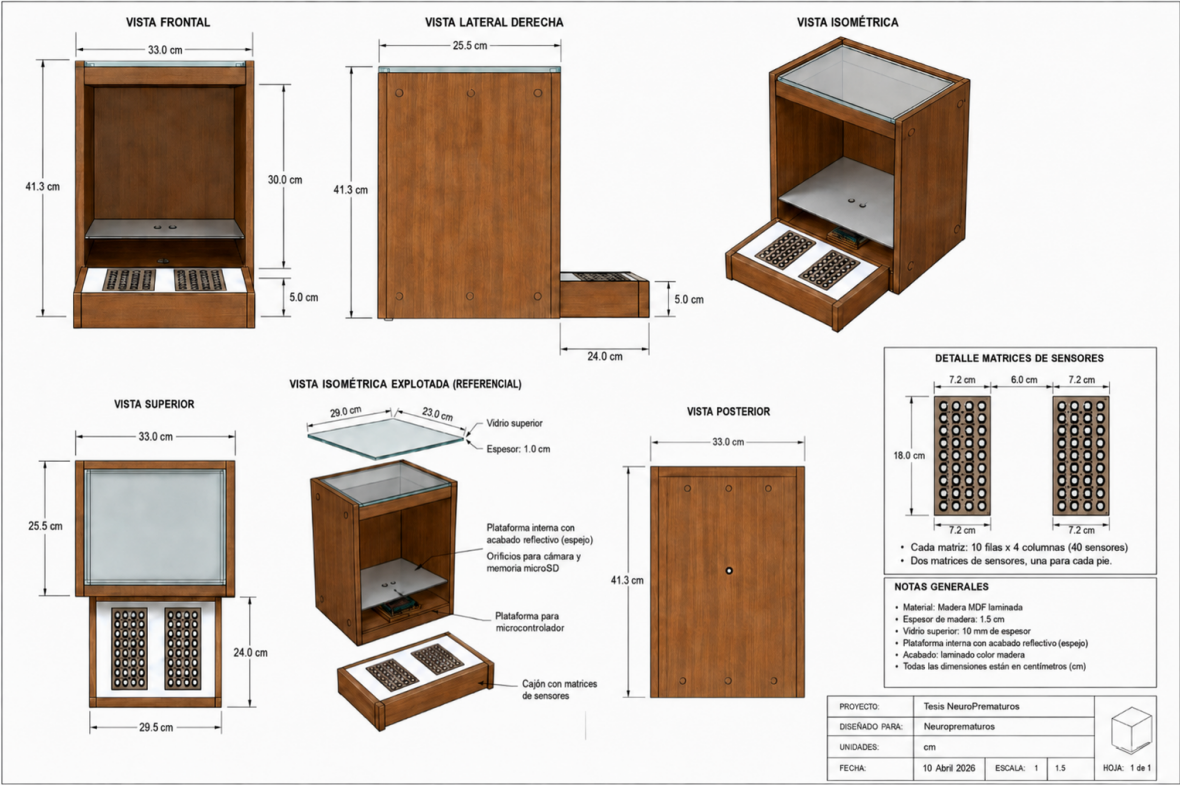


Figura 4.5: Plano general del diseño mecánico del podoscopio.



Figura 4.6: Ubicación de la cama de sensores sobre el cajón inferior instrumentado.

4.3.3. Criterios dimensionales, estabilidad y limpieza

Las dimensiones del prototipo se definieron a partir de criterios funcionales y mecánicos asociados al uso previsto del sistema. El tamaño del vidrio superior se planteó de manera que permitiera el apoyo simultáneo de ambos pies de la población infantil objetivo durante la captura fotográfica inicial. La altura del podoscopio se definió considerando la distancia necesaria para que la cámara pudiera registrar adecuadamente la superficie del vidrio sin cortar la huella plantar. Asimismo, la medición sobre sensores se integró en un cajón inferior extraíble, con el fin de incorporar la cama de sensado dentro de la misma estructura del podoscopio y conservar un sistema compacto, homogéneo y transportable.

El diseño priorizó la estabilidad del sistema durante la ubicación del usuario, la protección de los componentes internos y la seguridad estructural durante el uso supervisado. La carga de referencia de aproximadamente 50 kg se definió a partir de la información suministrada por el centro terapéutico sobre el peso esperado de los niños potencialmente beneficiarios del prototipo. La justificación de este valor y el procedimiento empleado para validar la capacidad de soporte del sistema se desarrollan con mayor detalle en el Capítulo 5, *Pruebas y evaluación del prototipo*, específicamente en la Sección 5.2, correspondiente a las pruebas mecánicas. La estructura tipo gabinete permite distribuir la carga aplicada sobre el vidrio superior y mantener los elementos electrónicos fuera del contacto directo con el usuario. Asimismo, el uso de superficies lisas, como el vidrio y las zonas expuestas del cajón, facilita la limpieza superficial del prototipo entre sesiones. Las recomendaciones específicas de limpieza y cuidado operativo del prototipo se presentan en el Anexo 4, correspondiente al Manual de Usuario.

En el Cuadro 4.5 se resumen las dimensiones principales consideradas en el modelo mecánico.

La Figura 4.7 muestra la disposición general de los elementos mecánicos, incluyendo el vidrio superior, la plataforma interna, la zona destinada al microcontrolador y el cajón inferior con las matrices de sensores.

Cuadro 4.5: Dimensiones principales del diseño mecánico del podoscopio.

Elemento	Dimensión aproximada
Ancho exterior del podoscopio	33.0 cm
Profundidad del cuerpo principal	25.5 cm
Altura total del podoscopio	41.3 cm
Altura interna útil de la apertura frontal	30.0 cm
Altura del cajón inferior	5.0 cm
Longitud de salida del cajón	24.0 cm
Ancho aproximado del cajón	29.5 cm
Dimensiones del vidrio superior	29.0 cm × 23.0 cm
Espesor del vidrio superior	1.0 cm
Dimensiones de cada matriz de sensores	7.2 cm × 18.0 cm
Separación entre matrices de sensores	6.0 cm
Espesor de la madera MDF	1.5 cm

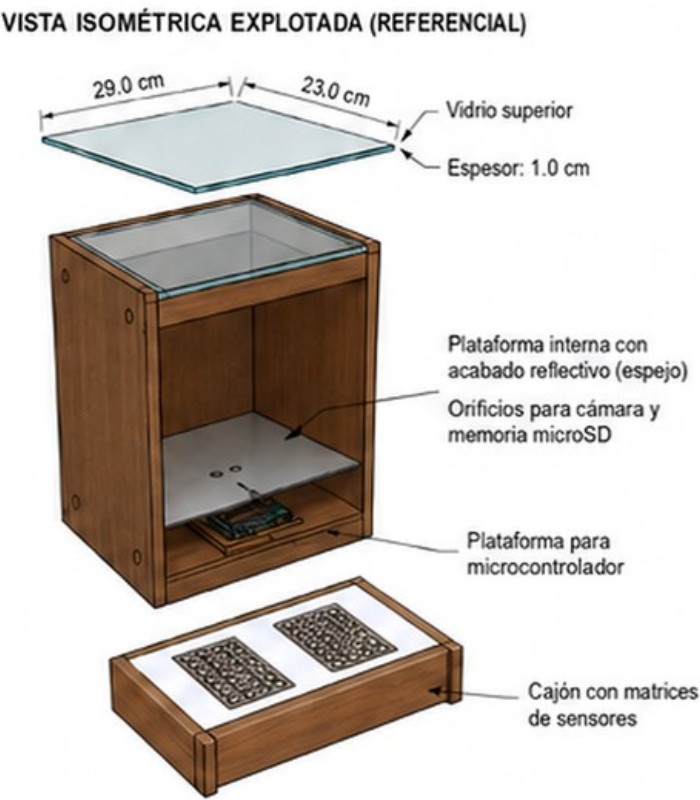
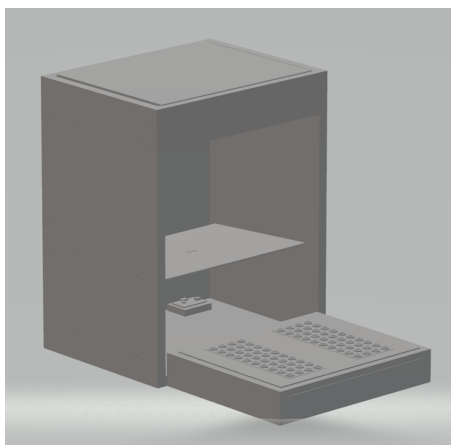


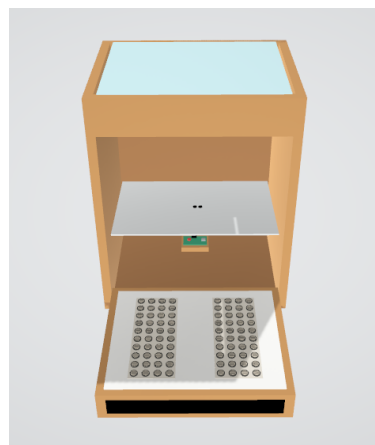
Figura 4.7: Vista explotada referencial de los elementos mecánicos del podoscopio.

4.3.4. Modelo tridimensional del prototipo

El modelo tridimensional permitió verificar la integración física de los elementos principales antes de la construcción. En los renders se observa la estructura de madera, el vidrio superior, la plataforma interna y el cajón inferior con las dos matrices de sensores. Esta representación facilitó la revisión espacial del diseño y la documentación técnica del prototipo.



(a) Vista isométrica del prototipo con cajón inferior instrumentado.



(b) Vista frontal del podoscopio con el cajón inferior.

Figura 4.8: Modelos tridimensionales del podoscopio con cajón inferior instrumentado.

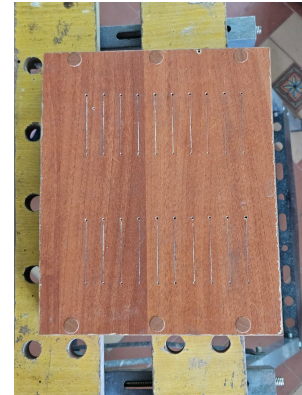
4.3.5. Construcción física del prototipo

Después de definir el modelo mecánico y las dimensiones principales, se realizó la construcción física del prototipo. Esta etapa incluyó el corte y ensamble de las piezas de madera, la preparación del cajón inferior, la apertura de orificios y ranuras para el paso del cableado, y la adecuación de los espacios destinados a la cámara, la memoria microSD, la PCB y la cama de sensores.

Para la fabricación se contó con el apoyo de un carpintero, quien orientó la selección de la madera de acuerdo con las exigencias estructurales del prototipo y el tipo de aplicación prevista. Además, participó en el corte, ensamble y adecuación de las piezas, lo que permitió materializar la estructura conforme a las dimensiones, perforaciones y espacios definidos en el diseño mecánico. Durante el ensamble se verificó que el cajón pudiera desplazarse sin obstrucciones, que las superficies de apoyo quedaran estables y que el cableado pudiera conducirse de forma ordenada hacia los componentes internos. La evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción, conexión preliminar de sensores, montaje e integración física del prototipo se presenta en el Anexo 5.



(a) Preparación inicial de la estructura de madera.



(b) Adecuación del cajón inferior.



(c) Ranuras para el paso de conexiones.



(d) Vista superior de la estructura construida.

Figura 4.9: Etapas principales de construcción y adecuación física del podoscopio.

4.4. Diseño de la cama de sensores

La cama de sensores corresponde al elemento físico encargado de registrar el apoyo plantar del usuario y convertirlo en señales eléctricas medibles. Su diseño se planteó para obtener una representación relativa del apoyo de ambos pies durante la bipedestación asistida, mediante una matriz compacta, organizada y compatible con el cajón inferior del podoscopio.

El sistema se conformó por 80 sensores resistivos de fuerza FSR 402, distribuidos en dos matrices independientes de 40 sensores cada una. Cada matriz se asoció a un pie y se organizó en una configuración de 10 filas por 4 columnas. Esta disposición permite diferenciar el apoyo izquierdo y derecho, conservar una relación directa entre la posición física de cada sensor y su lectura, y representar posteriormente la distribución relativa del apoyo en la interfaz del sistema.

A diferencia de una plataforma comercial de alta densidad, la cama de sensores desarrollada no busca realizar un análisis podológico avanzado ni obtener mediciones absolutas de presión con fines diagnósticos. Su propósito es identificar zonas activas, diferencias relativas de carga y patrones

generales de apoyo que puedan ser revisados de forma rápida durante la sesión.

4.4.1. Selección de sensores

La selección del sensor fue una decisión central para el diseño de la cama instrumentada, debido a que el prototipo requería múltiples puntos de medición distribuidos sobre un área reducida. Para esta etapa se revisaron diferentes alternativas tecnológicas, entre ellas celdas de carga tipo botón, sensores FlexiForce, sensores resistivos de fuerza tipo FSR, sensores piezoeléctricos o de película PVDF, y matrices comerciales de presión plantar de alta densidad [23, 24, 25].

El Cuadro 4.6 presenta un resumen comparativo de las principales alternativas de sensado evaluadas durante esta etapa del diseño.

Cuadro 4.6: Resumen comparativo de las alternativas de sensado evaluadas para la selección del sensor de presión de la cama instrumentada.

Resumen de alternativas de sensores

Alternativa	Ventaja clave	Limitación clave	Decisión
Celdas de carga tipo botón	Alta precisión y linealidad para carga estática.	Mayor complejidad mecánica y mayor costo por punto.	No seleccionada
FlexiForce A201	Ultrafino y adecuado para sensado distribuido.	Mayor costo y menor disponibilidad.	No seleccionada
FSR 402	Bajo espesor, fácil integración y apto para matrices densas.	Menor precisión absoluta; requiere calibración.	Seleccionada
Piezoeléctricos / PVDF	Útiles para eventos dinámicos.	No adecuados para carga sostenida.	No seleccionada
Matrices comerciales (Tekscan)	Alta resolución espacial.	Costo elevado y arquitectura cerrada.	No seleccionada

Las celdas de carga tipo botón fueron consideradas por su capacidad para estimar fuerzas de compresión con mayor precisión y mejor linealidad [23]. Sin embargo, su integración en una matriz de numerosos puntos habría requerido mayor espacio mecánico, acondicionamiento individual, más conexiones y una estructura de soporte más compleja. Por esta razón, aunque eran adecuadas para mediciones de carga absoluta, no resultaban convenientes para la arquitectura compacta del prototipo.

También se revisaron sensores FlexiForce y matrices comerciales de presión plantar. Los sensores FlexiForce ofrecen un formato delgado y flexible para medición de fuerza entre superficies [24], mientras que matrices como la Tekscan 5250HT-MED están orientadas al mapeo de presión mediante

arreglos de alta densidad [25]. Estas alternativas eran técnicamente atractivas, pero presentaban limitaciones de disponibilidad, mayor costo al escalar el sistema a múltiples puntos de sensado y menor flexibilidad para desarrollar una solución propia de adquisición, procesamiento y visualización.

Los sensores piezoeléctricos y de película PVDF se descartaron porque su comportamiento es más adecuado para detectar variaciones dinámicas, impactos o cambios rápidos de fuerza. En este proyecto, la medición se orienta al registro del apoyo durante un intervalo sostenido de bipedestación asistida, por lo que se requería una alternativa más apropiada para observar cargas mantenidas durante varios segundos.

Con base en esta comparación, se seleccionó el sensor resistivo de fuerza FSR 402. Este dispositivo modifica su resistencia eléctrica cuando se aplica una fuerza normal sobre su zona activa, de manera que el aumento de la carga produce una disminución de la resistencia. Mediante su incorporación en un divisor de voltaje, esta variación resistiva puede convertirse en una señal analógica y posteriormente en una lectura digital obtenida por el convertidor analógico–digital del microcontrolador [26]. Su geometría compacta, bajo espesor y facilidad de integración permitieron distribuir 80 puntos de sensado en el cajón instrumentado sin aumentar de forma considerable el volumen de la estructura.

De acuerdo con la hoja de datos correspondiente al FSR 402, P/N 30-81794, el sensor presenta una fuerza de actuación cercana a 0,1 N y un intervalo nominal de sensibilidad comprendido entre aproximadamente 0,1 y 10,02 N. El dispositivo posee un diámetro exterior de 18,28 mm, mientras que su zona activa circular presenta un diámetro de 12,7 mm. Asimismo, el fabricante reporta una vida útil de hasta 10 millones de activaciones bajo las condiciones especificadas de ensayo [26]. Estos valores describen el comportamiento nominal del componente, pero no deben interpretarse como una carga máxima estructural ni como garantía de que el sensor produzca la misma lectura en cualquier condición de montaje. El propio fabricante indica que la sensibilidad depende de la configuración mecánica mediante la cual se aplica la fuerza y que la resolución final también depende de la electrónica de medición.

La respuesta del sistema se obtiene a través de una cadena de conversión compuesta por la fuerza aplicada, la resistencia del FSR, el voltaje generado por el divisor y el valor digital entregado por el convertidor analógico–digital. En una configuración convencional de divisor de voltaje, la salida puede representarse de manera general mediante la expresión

$$V_{\text{out}} = V_{\text{cc}} \frac{R_{\text{M}}}{R_{\text{M}} + R_{\text{FSR}}}, \quad (4.7)$$

donde R_{FSR} corresponde a la resistencia variable del sensor y R_{M} a la resistencia fija de medición. Debido a que R_{FSR} no varía linealmente con la fuerza, el voltaje obtenido y la lectura digital tampoco mantienen una relación lineal con la carga aplicada. En consecuencia, dos incrementos iguales de fuerza no necesariamente producen dos incrementos iguales en el valor visualizado por el sistema.

La resistencia fija del divisor también determina la región de la curva en la que se obtiene una mayor sensibilidad. Una resistencia de medición determinada puede favorecer la diferenciación de cargas bajas, pero hacer que la salida se aproxime rápidamente al límite superior del voltaje y del convertidor analógico–digital. Otra selección puede ampliar el intervalo útil para cargas mayores,

pero comprimir las variaciones producidas por cargas pequeñas. Por esta razón, la lectura digital debe entenderse como la respuesta eléctrica del conjunto formado por el sensor, el divisor de voltaje y el sistema de adquisición, y no como una conversión directa y uniforme entre fuerza y unidades digitales [26].

Adicionalmente, aunque los 80 sensores pertenecen al mismo modelo, sus curvas de transferencia no son exactamente iguales. La hoja de datos reporta una repetibilidad aproximada de $\pm 2\%$ para mediciones sucesivas realizadas sobre una misma unidad y una variación entre unidades cercana a $\pm 6\%$, bajo un sistema de actuación repetible [26]. Estos porcentajes corresponden a las condiciones controladas definidas por el fabricante y no representan por sí solos el error total del sistema. En el prototipo también pueden influir la posición exacta en la que el pie actúa sobre cada sensor, la extensión de la superficie que transmite la carga, la uniformidad del apoyo, la rigidez de las capas ubicadas sobre y debajo del FSR y cualquier flexión o indentación local del dispositivo. Por esta razón, dos sensores sometidos aparentemente a una carga similar pueden generar valores diferentes.

El FSR también presenta histéresis, lo que implica que su respuesta durante el incremento de la carga puede diferir de la obtenida durante su disminución. La hoja de datos del modelo empleado reporta una histéresis aproximada del 10% , además de posibles variaciones asociadas con el tiempo de aplicación de la carga [26]. De igual manera, estudios anteriores señalan que la respuesta puede verse afectada por el método de aplicación, la deformación del sensor, las condiciones ambientales y el uso acumulado del componente [27]. Estos factores explican por qué no resulta apropiado asumir que todos los sensores comparten una única correspondencia exacta entre fuerza, resistencia y lectura digital.

En el trabajo desarrollado por Morris se caracterizaron varios sensores FSR 402 mediante la aplicación controlada de diferentes fuerzas. Debido al comportamiento no lineal observado, fue necesario ajustar una función exponencial con un polinomio de tercer orden para aproximar la relación entre la salida del sensor y la fuerza aplicada. En esa configuración experimental se obtuvo un error medio de aproximadamente $\pm 14,95$ N para los intervalos de confianza del 95% , por lo que la autora consideró que la incertidumbre era elevada para realizar un análisis numérico directo de la distribución de fuerzas sin mejorar previamente la linealización y el acondicionamiento de la señal [27]. Este resultado no corresponde al error medido del prototipo desarrollado en este proyecto, debido a que ambos sistemas utilizan condiciones mecánicas, intervalos de carga y circuitos de lectura diferentes. Sin embargo, constituye un antecedente que evidencia las limitaciones de utilizar una curva general para convertir directamente las lecturas de distintos FSR en valores absolutos de fuerza.

Para expresar presión sería necesario determinar tanto la fuerza aplicada como el área efectiva sobre la cual se distribuye dicha fuerza. En el prototipo no se realiza una calibración individual fuerza-lectura de cada uno de los 80 sensores ni se determina el área real de contacto que actúa sobre cada punto. En consecuencia, los valores obtenidos no se presentan en newtons, kilogramos-fuerza, pascas o kilopascas, y tampoco se consideran mediciones absolutas de presión plantar. Su función es representar la intensidad relativa de activación de los puntos de sensado y la distribución espacial del apoyo sobre las dos matrices.

Con el propósito de facilitar la interpretación del informe final, las lecturas procesadas se norma-

lizan con respecto al sensor que registra la mayor respuesta durante cada medición. Si L_i representa la lectura procesada del sensor i y $L_{\text{máx}}$ corresponde a la mayor lectura encontrada entre los 80 puntos de sensado, el porcentaje de apoyo relativo se calcula mediante

$$A_i = \frac{L_i}{L_{\text{máx}}} \times 100 \%. \quad (4.8)$$

De esta manera, el punto con la mayor lectura se representa como 100 %, mientras que los demás sensores se expresan proporcionalmente respecto a dicha referencia. Por ejemplo, una lectura representada como 50 % indica que la respuesta eléctrica procesada de ese sensor equivale a la mitad de la respuesta registrada por el sensor de referencia. Debido a la no linealidad de los FSR, este resultado no significa necesariamente que sobre ese punto actúe la mitad de la fuerza o la mitad de la presión física.

Esta normalización no elimina completamente las diferencias de sensibilidad entre sensores ni sustituye una calibración individual. Su finalidad es establecer una escala común de visualización para cada medición y evitar que los valores digitales sin unidades sean interpretados como magnitudes físicas absolutas. En el informe, los porcentajes se presentan numéricamente y mediante una representación por colores, permitiendo identificar el punto de máxima activación y las regiones que concentran los mayores niveles de apoyo relativo.

Por consiguiente, la fisioterapeuta puede utilizar el informe para reconocer en qué zonas del apoyo plantar se encuentran las mayores concentraciones relativas de carga, observar la distribución espacial entre los diferentes puntos y complementar su valoración clínica con la fotografía de posicionamiento y la información registrada durante la sesión. Las comparaciones entre mediciones deben centrarse principalmente en el patrón espacial y en la distribución relativa del apoyo, procurando mantener condiciones semejantes de ubicación y adquisición. Los porcentajes mostrados no representan porcentajes del peso corporal, porcentajes de la fuerza total ni valores absolutos de presión, por lo que se denominan *porcentajes de apoyo relativo*.

4.4.2. Distribución y organización de los puntos de sensado

La distribución de los puntos de sensado se definió para cubrir el área principal de apoyo plantar infantil y mantener correspondencia entre la ubicación física de cada sensor, su canal de lectura y su posición en la visualización del reporte. Para ello, los 80 sensores FSR 402 se organizaron en dos matrices independientes de 40 sensores, una para el pie izquierdo y otra para el pie derecho.

Cada matriz se estructuró en 10 filas por 4 columnas. Las filas cubren la dirección longitudinal de la huella, desde la zona posterior hasta la zona anterior del pie, mientras que las columnas permiten registrar variaciones transversales entre las regiones medial, central y lateral. Cada arreglo ocupa un área aproximada de 7,2 cm de ancho por 18,0 cm de largo, con una separación aproximada de 6,0 cm entre matrices.

El tamaño de las matrices se definió tomando como referencia la información comunicada por el personal del centro terapéutico acerca de la población infantil potencialmente beneficiaria del prototipo, especialmente en relación con la escala corporal y las dimensiones esperadas de los pies.

Esta referencia se complementó con muestras de huellas de pintura utilizadas en el centro, las cuales permitieron estimar el área principal de contacto plantar que debía cubrir cada matriz.

Desde el punto de vista funcional, la distribución rectangular no pretende reproducir una segmentación anatómica exacta de la planta del pie. Su finalidad es cubrir la zona esperada de apoyo y conservar un margen suficiente frente a pequeñas variaciones de posicionamiento durante la bipedestación asistida. De esta manera, la matriz permite identificar contacto, ausencia de contacto y diferencias relativas de carga dentro de cada pie.

Durante el montaje físico de la cama de sensores, cada FSR se fijó sobre la superficie del cajón mediante adhesivo instantáneo de alta resistencia tipo cianoacrilato, con el fin de conservar la posición definida para cada punto de sensado. Se dejó expuesta únicamente la zona activa circular del sensor, correspondiente al área diseñada para recibir el apoyo plantar, mientras que las terminales y uniones soldadas quedaron ubicadas fuera de la zona directa de contacto. Después de la soldadura, las terminales fueron aisladas con silicona para evitar contactos eléctricos no deseados y reducir el riesgo de cortocircuitos entre conductores. El cableado se condujo hacia el interior del cajón, aprovechando la estructura de madera sólida como superficie de soporte, de manera que el usuario apoyara el pie sobre la zona instrumentada y no directamente sobre los cables internos.

La Figura 4.10 presenta la distribución física de los 80 sensores FSR 402 sobre el cajón instrumentado, organizados en dos matrices independientes de 40 puntos de sensado.

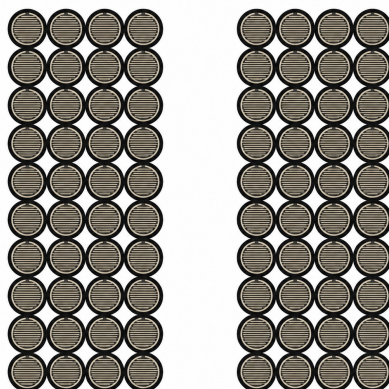


Figura 4.10: Distribución física de los 80 sensores FSR 402 sobre el cajón instrumentado

Cada sensor quedó identificado por matriz, fila, columna y canal de lectura. Esta identificación permite mantener trazabilidad entre la cama física, la conexión hacia la PCB, la programación del firmware y la representación gráfica del informe HTML.

4.4.3. Conexión física entre sensores y PCB

La conexión física entre la cama de sensores y la PCB de adquisición se definió para centralizar las señales provenientes de los 80 sensores FSR 402 y conservar el orden de correspondencia entre

posición real, canal electrónico y visualización. Esta organización es necesaria para evitar errores de interpretación durante la revisión de los datos registrados.

Cada sensor FSR 402 cuenta con dos terminales, los cuales fueron conducidos hacia conectores asociados a la PCB de adquisición. El cableado se organizó separando las señales correspondientes a la matriz izquierda y a la matriz derecha, de manera que cada grupo de sensores pudiera ser identificado y verificado de forma independiente. La etapa específica de acondicionamiento y multiplexación de estas señales se desarrolla en la sección correspondiente al diseño electrónico de adquisición.

La Figura 4.11 muestra la organización interna del cableado proveniente de los sensores FSR antes de su conexión a la PCB de adquisición. Esta disposición permitió agrupar las señales por conectores y mantener la trazabilidad entre la cama de sensores, los canales electrónicos y la representación posterior en el reporte HTML.



Figura 4.11: Organización interna del cableado de los sensores FSR hacia los conectores de la PCB de adquisición.

La Figura 4.12 presenta la asignación de los sensores FSR 402 a los conectores y pines de la PCB de adquisición. En el esquema se separan las dos matrices de 40 sensores, correspondientes al pie izquierdo y al pie derecho, manteniendo la organización por filas y columnas usada en la cama de sensores.

Organización de sensores FSR402 en dos matrices de 4 x 10

Matriz izquierda (4 x 10)				
1	CON10/PIN6	CON10/PIN7	CON10/PIN8	CON10/PIN9
2	CON10/PIN2	CON10/PIN3	CON10/PIN4	CON10/PIN5
3	CON9/PIN6	CON9/PIN7	CON9/PIN8	CON9/PIN9
4	CON9/PIN2	CON9/PIN3	CON9/PIN4	CON9/PIN5
5	CON8/PIN6	CON8/PIN7	CON8/PIN8	CON8/PIN9
6	CON8/PIN2	CON8/PIN3	CON8/PIN4	CON8/PIN5
7	CON7/PIN6	CON7/PIN7	CON7/PIN8	CON7/PIN9
8	CON7/PIN2	CON7/PIN3	CON7/PIN4	CON7/PIN5
9	CON6/PIN6	CON6/PIN7	CON6/PIN8	CON6/PIN9
10	CON6/PIN2	CON6/PIN3	CON6/PIN4	CON6/PIN5
Columna 1 Columna 2 Columna 3 Columna 4				

Matriz derecha (4 x 10)				
1	CON5/PIN6	CON5/PIN7	CON5/PIN8	CON5/PIN9
2	CON5/PIN2	CON5/PIN3	CON5/PIN4	CON5/PIN5
3	CON4/PIN6	CON4/PIN7	CON4/PIN8	CON4/PIN9
4	CON4/PIN2	CON4/PIN3	CON4/PIN4	CON4/PIN5
5	CON3/PIN6	CON3/PIN7	CON3/PIN8	CON3/PIN9
6	CON3/PIN2	CON3/PIN3	CON3/PIN4	CON3/PIN5
7	CON2/PIN6	CON2/PIN7	CON2/PIN8	CON2/PIN9
8	CON2/PIN2	CON2/PIN3	CON2/PIN4	CON2/PIN5
9	CON1/PIN6	CON1/PIN7	CON1/PIN8	CON1/PIN9
10	CON1/PIN2	CON1/PIN3	CON1/PIN5	CON1/PIN4
Columna 1 Columna 2 Columna 3 Columna 4				

Figura 4.12: Asignación de los sensores FSR 402 a los conectores y pines de la PCB de adquisición para las matrices izquierda y derecha.

Durante el montaje, los conductores se ubicaron de forma que no interfirieran con la superficie de apoyo ni con el desplazamiento del cajón instrumentado. Esta organización facilitó la revisión de continuidad, la detección de errores de conexión y la protección del cableado dentro de la estructura del podoscopio.

4.5. Diseño electrónico de adquisición

El diseño electrónico de adquisición se desarrolló a partir de una placa de circuito impreso encargada de recibir, acondicionar y organizar las señales provenientes de los 80 sensores FSR ubicados en la cama de sensado. Esta PCB integra los conectores de entrada, la red de divisores de voltaje, la etapa de multiplexación, la unidad de procesamiento ESP32-S3 y los elementos de alimentación necesarios para realizar la lectura secuencial de los puntos de apoyo.

La placa se diseñó con una arquitectura modular, separando funcionalmente la conexión de sensores, el acondicionamiento básico de señal, la multiplexación analógica, el procesamiento y la alimentación. Esta organización permitió reducir la complejidad del cableado, conservar la correspondencia entre las matrices físicas y los canales electrónicos, y facilitar la verificación progresiva del sistema.

4.5.1. Arquitectura general de la placa

La arquitectura general de la PCB se estructuró en cuatro bloques principales: conexión de sensores, acondicionamiento básico de señal, multiplexación analógica y procesamiento. La conexión de sensores se realizó mediante diez conectores de diez pines, identificados como CON1 a CON10. Cada conector agrupa ocho sensores junto con sus líneas asociadas, permitiendo integrar los 80 puntos de sensado en una sola placa.

Los conectores CON1 a CON5 corresponden a una matriz de 40 sensores, mientras que los conectores CON6 a CON10 corresponden a la segunda matriz. Esta distribución permitió conservar una organización simétrica entre ambos lados de la PCB y facilitar la identificación de señales durante el montaje, diagnóstico y verificación del sistema.

La etapa de multiplexación se implementó mediante seis circuitos integrados CD74HC4067PWR, encargados de seleccionar secuencialmente las señales analógicas provenientes de los sensores. La unidad de procesamiento se implementó con un módulo ESP32-S3-WROOM-1, encargado de controlar las líneas de selección de los multiplexores y recibir las señales analógicas seleccionadas.

En conjunto, esta arquitectura permitió integrar en una sola PCB la conexión física de los sensores, la selección de canales, la lectura analógica y los elementos auxiliares requeridos para programación, alimentación y control básico de la placa.

4.5.2. Acondicionamiento de señales de los sensores FSR

Los sensores FSR presentan una variación resistiva en función de la fuerza aplicada sobre su superficie. Para convertir esta variación en una señal medible por el microcontrolador, cada sensor se conectó en una configuración de divisor de voltaje con una resistencia fija de 10 k Ω , siguiendo el principio de lectura recomendado para este tipo de sensores [26].

El uso de una misma resistencia de referencia en todos los canales permitió conservar una configuración eléctrica homogénea para los 80 puntos de sensado. De esta manera, todos los sensores son leídos bajo el mismo principio de conversión resistencia-voltaje y sus resultados pueden compararse dentro de una misma sesión.

En este contexto, la comparación no se realiza en unidades absolutas de presión, sino a partir de la intensidad de respuesta registrada por cada sensor. Posteriormente, las lecturas se expresan como porcentajes de apoyo relativo respecto al sensor que presenta la mayor activación durante la medición. Por tanto, el sistema permite identificar qué zonas de la matriz registran mayor o menor apoyo dentro de la misma sesión, sin interpretar los valores obtenidos como presión en pascales, kilopascales u otra unidad física.

Adicionalmente, se incorporaron capacitores de desacoplamiento de 100 nF y capacitores de filtrado en las líneas de alimentación de los circuitos integrados. Estos elementos se emplearon para mejorar la estabilidad local de la PCB y reducir variaciones no deseadas durante la operación de los multiplexores y del microcontrolador.

La arquitectura eléctrica de ambas matrices sigue el mismo principio de acondicionamiento mediante divisores de voltaje y multiplexación analógica. Por esta razón, en la Figura 4.13 se presenta una matriz representativa de 40 sensores, mientras que la segunda matriz replica la misma lógica

de conexión para completar los 80 puntos de sensado del sistema. El esquemático complementario de la segunda matriz se presenta en el Anexo 1.

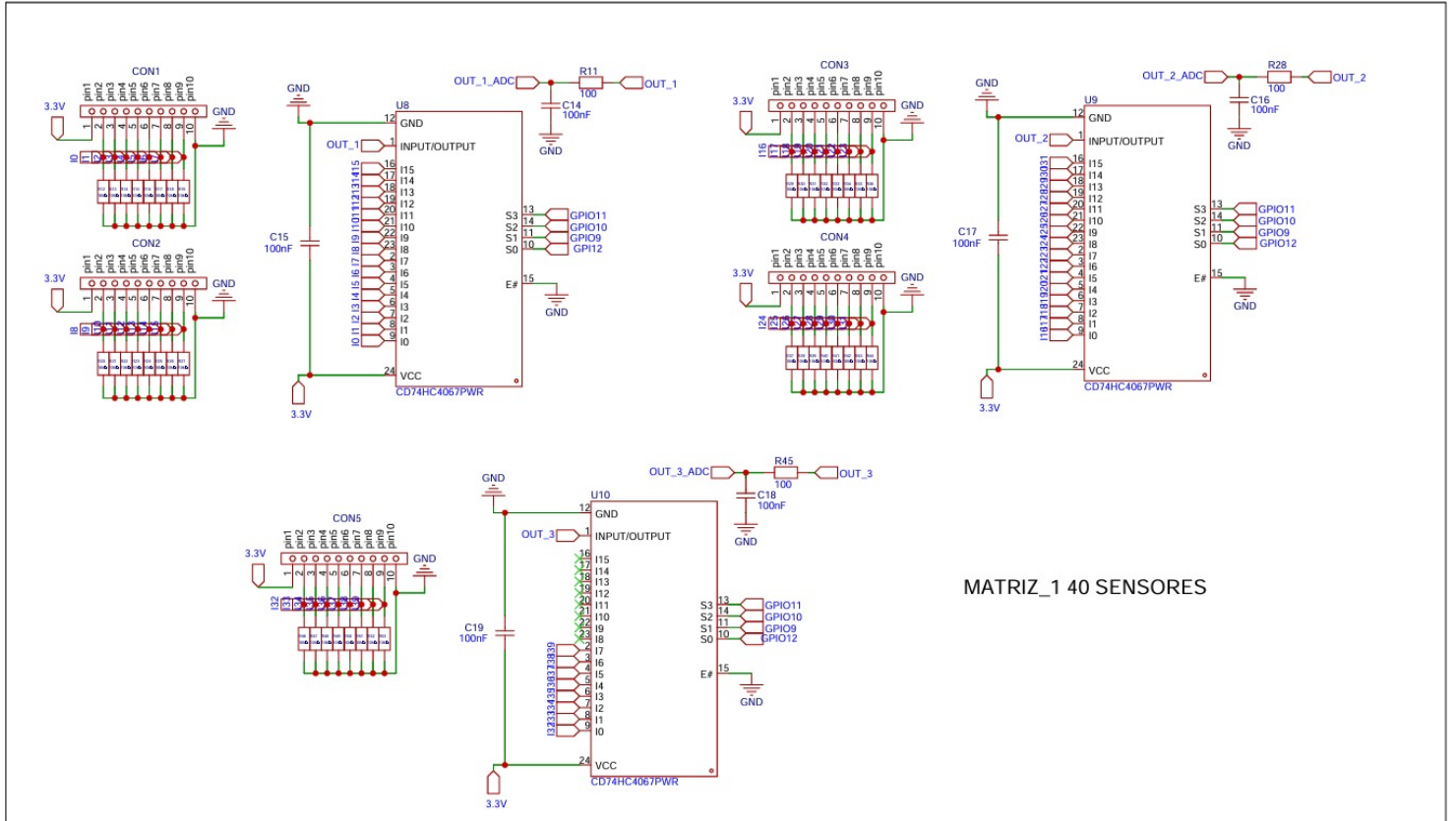


Figura 4.13: Esquemático representativo de una matriz de 40 sensores FSR con acondicionamiento mediante divisores de voltaje.

4.5.3. Etapa de multiplexación de señales

Debido a que el sistema requiere adquirir señales provenientes de 80 sensores FSR, se incorporó una etapa de multiplexación para reducir la cantidad de entradas analógicas necesarias en el microcontrolador. Para esta función se emplearon seis multiplexores CD74HC4067PWR, cada uno con capacidad de selección de hasta 16 canales analógicos [20].

Aunque los 80 sensores podrían cubrirse teóricamente con cinco multiplexores de 16 canales, se utilizaron seis circuitos integrados con el fin de conservar una distribución balanceada entre las dos matrices. De esta forma, cada matriz de 40 sensores cuenta con tres multiplexores, con una capacidad disponible de 48 canales por lado.

La capacidad total de la etapa de multiplexación se expresa como:

$$6 \text{ multiplexores} \times 16 \text{ canales} = 96 \text{ canales} \quad (4.9)$$

De estos 96 canales disponibles, se utilizaron 80 para los sensores implementados. Los canales restantes quedaron libres como resultado de la distribución simétrica adoptada para facilitar el diseño físico de la PCB y el enrutamiento de señales.

Las líneas de selección de los multiplexores se conectaron a pines GPIO del ESP32-S3. Durante la adquisición, el microcontrolador selecciona un canal activo y recibe la señal analógica correspondiente antes de avanzar al siguiente punto de sensado.

4.5.4. Unidad de procesamiento ESP32-S3

De acuerdo con la selección presentada en la Sección 4.2, la unidad de procesamiento de la PCB se implementó mediante un módulo ESP32-S3-WROOM-1-N16R8. Dentro de la arquitectura de adquisición, este dispositivo controla las líneas de selección de los multiplexores, recibe las señales analógicas y organiza las lecturas antes de su transmisión hacia la unidad receptora.

La ubicación del módulo en la zona inferior central de la PCB permitió separar físicamente el área de procesamiento de la zona de conectores y multiplexores. Esta disposición favoreció un diseño más ordenado y facilitó la conexión con los elementos de programación, reinicio, habilitación y alimentación.

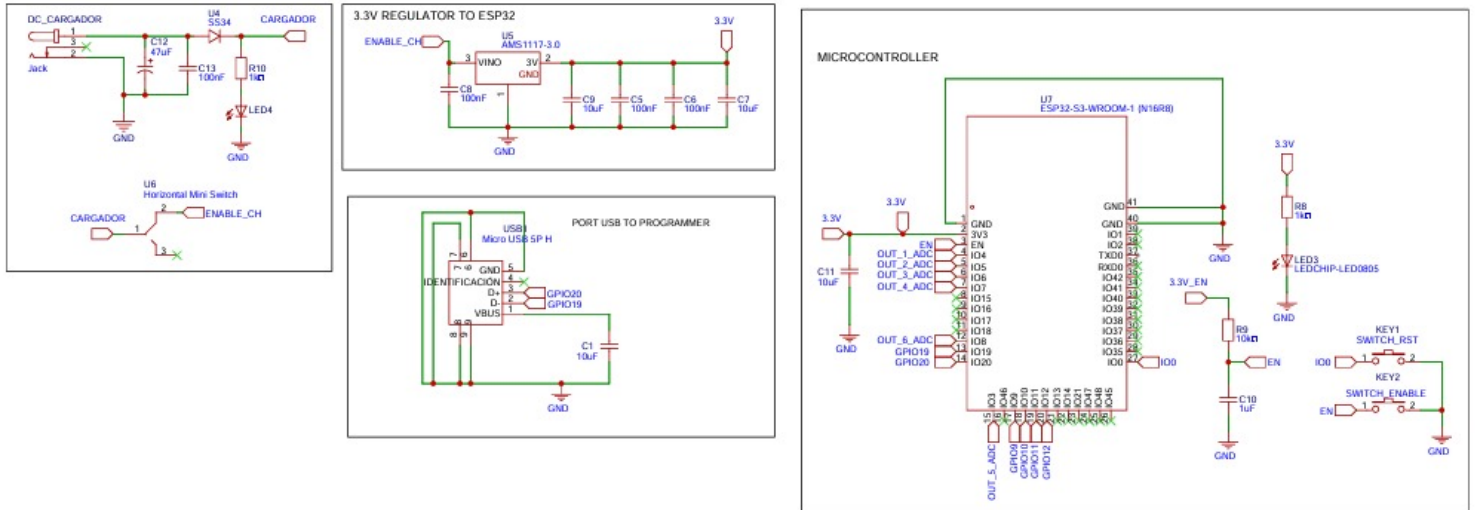


Figura 4.14: Esquemático de la etapa de microcontrolador, programación y señales de control de la PCB de adquisición.

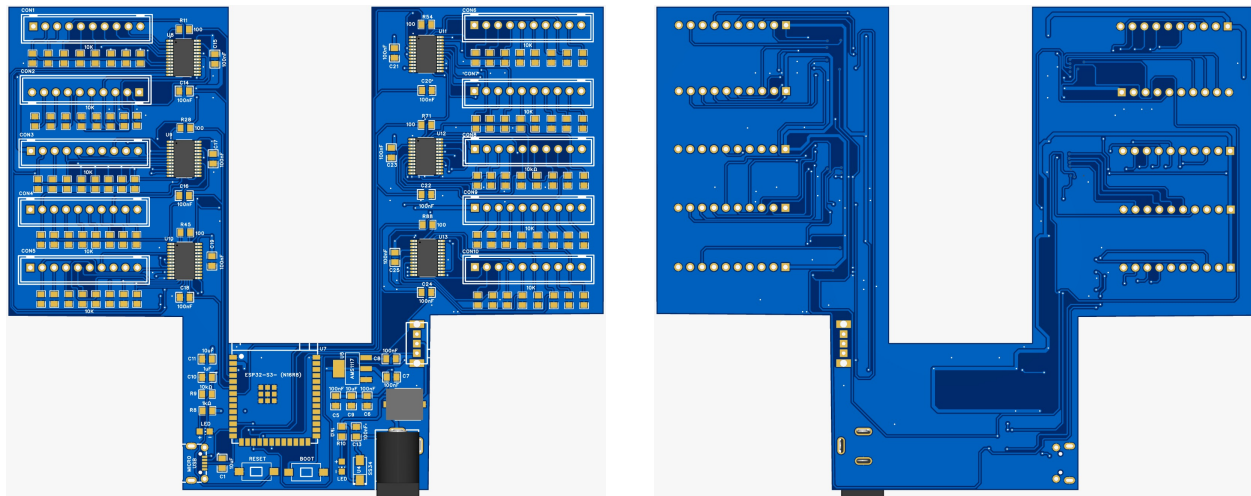
4.5.5. Diseño físico y distribución de la PCB

El diseño físico de la PCB se realizó considerando la separación entre las zonas de conexión de sensores, multiplexación, procesamiento y alimentación. En la parte superior izquierda se ubicaron

los conectores CON1 a CON5, asociados a la primera matriz de sensores, mientras que en la parte superior derecha se ubicaron los conectores CON6 a CON10, correspondientes a la segunda matriz.

Los multiplexores se ubicaron cerca de los conectores de sensores para reducir la longitud de las rutas analógicas hacia la etapa de selección. El módulo ESP32-S3 se ubicó en la zona inferior central de la placa, mientras que la entrada de alimentación, el regulador y los elementos asociados se ubicaron en la zona inferior derecha. Esta distribución permitió organizar las rutas eléctricas y separar las señales de sensores de las líneas de alimentación y programación.

La PCB se diseñó en doble cara, utilizando pistas en la capa superior e inferior para completar el enrutamiento de las señales. Esta decisión permitió conectar un número elevado de sensores sin concentrar todas las rutas en una sola capa. Además, la revisión del diseño físico permitió verificar la ubicación de los componentes antes de la fabricación de la placa.



(a) Vista superior de la PCB.

(b) Vista inferior de la PCB.

Figura 4.15: Distribución física de la PCB en sus capas superior e inferior.

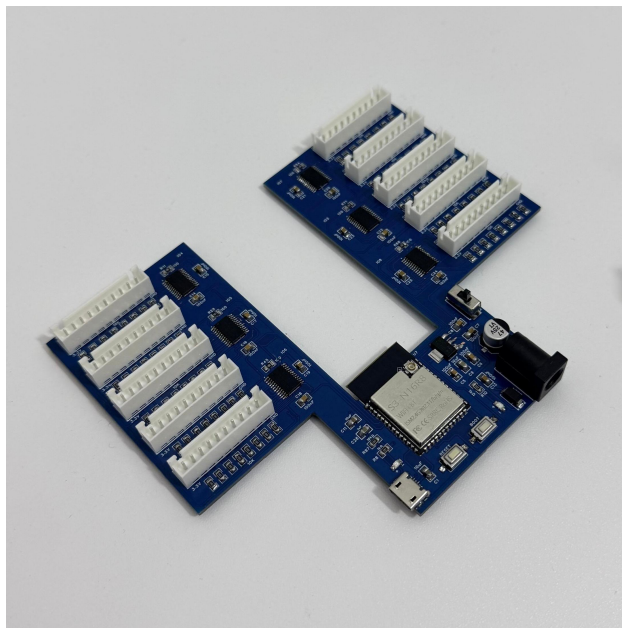


Figura 4.16: PCB fabricada para la conexión de los sensores FSR, la etapa de multiplexación y el módulo de procesamiento ESP32-S3.

La fabricación de la PCB permitió integrar físicamente los conectores de sensores, los circuitos multiplexores, el módulo ESP32-S3 y la etapa de alimentación en una misma placa. Con ello, el sistema de adquisición pasó de una etapa de conexión preliminar a una implementación electrónica compacta y apta para las pruebas de lectura de sensores.

4.5.6. Etapa de alimentación y distribución eléctrica

La alimentación del prototipo se organizó a partir de una entrada desmontable de red de 120 V AC, desde la cual se distribuye energía hacia dos ramas principales: la iluminación interna del podoscopio y la fuente AC-DC encargada de alimentar los módulos electrónicos. La fase y el neutro que ingresan al sistema alimentan en paralelo la tira de luces LED y el rectificador, ubicando el fusible general de 0.5 A en serie con la línea de fase antes de la distribución, de manera que su apertura desenergice el sistema completo.

La tira de luces LED opera directamente con 120 V AC y se utiliza para iluminar el vidrio superior durante la captura fotográfica de la huella plantar. Por otro lado, la fuente AC-DC convierte la entrada de red en una salida de 5 V DC, empleada para alimentar el ESP32 receptor con cámara y el ESP32 asociado a la lectura de sensores. La derivación de 5 V DC se realizó manteniendo una línea positiva común y una referencia GND común para ambos módulos.

Debido a que la estructura del podoscopio es de madera y no cuenta con chasis metálico, no se implementó una conexión de tierra de protección hacia la estructura. Por esta razón, la seguridad eléctrica del sistema se abordó mediante aislamiento físico de conexiones, protección mediante fusible

y separación entre la red AC y las etapas electrónicas de baja tensión.

La Figura 4.17 presenta el esquema general de alimentación del prototipo, incluyendo la entrada de red, protección principal, distribución AC, conversión a 5 V DC y alimentación de los módulos ESP32.

La versión ampliada del esquemático de alimentación general se presenta en el Anexo 7, con el fin de facilitar la revisión de la entrada de red AC, la protección mediante fusible, la distribución hacia la iluminación interna y la derivación de 5 V DC hacia los módulos electrónicos.

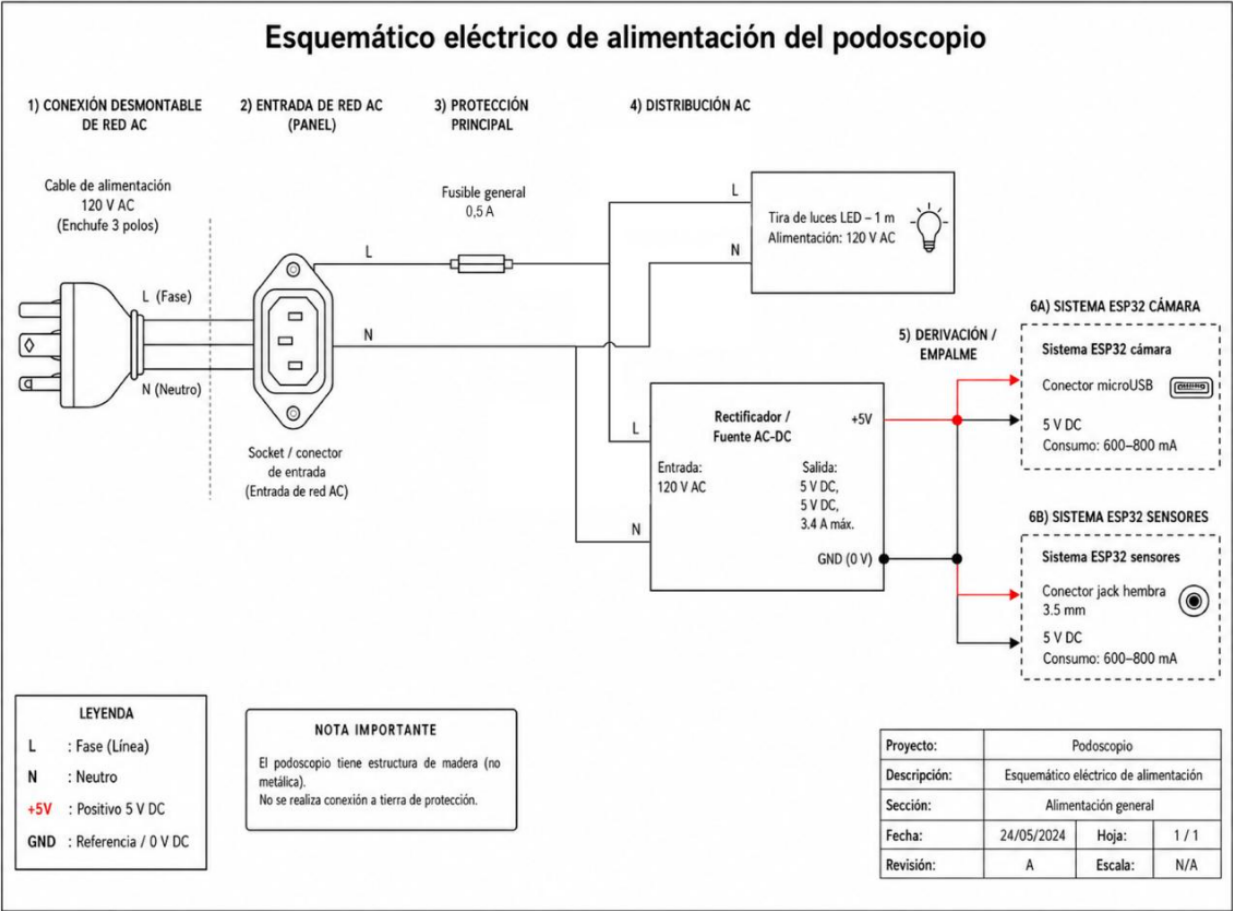


Figura 4.17: Esquemático eléctrico de alimentación y distribución general del podoscopio.

Dentro de la electrónica de adquisición se empleó regulación local para obtener niveles de tensión compatibles con los circuitos de la PCB. En esta etapa se incorporó el regulador AMS1117, junto con capacitores de filtrado y desacoplamiento para estabilizar la alimentación durante la operación del microcontrolador y los multiplexores [21]. Además, se incluyó un diodo SS34 en la línea de entrada como elemento de conducción y protección, aprovechando la baja caída de tensión directa característica de los diodos Schottky [22].

La Figura 4.18 muestra la conexión representativa de los LEDs indicadores y del botón de captura asociados al ESP32 receptor con cámara.

Conexión de LEDs indicadores y botón de captura (ESP32 cámara)

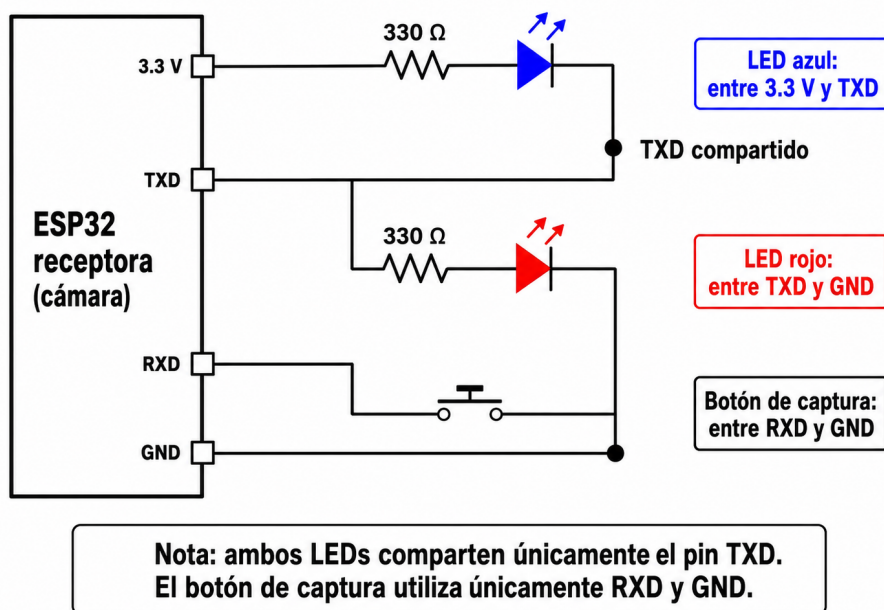


Figura 4.18: Conexión de LEDs indicadores y botón de captura en el ESP32 receptor con cámara.

4.6. Sistema de comunicación, captura, almacenamiento y firmware

El firmware del prototipo se desarrolló para coordinar la adquisición de los sensores FSR, la captura fotográfica inicial, la comunicación entre microcontroladores, el almacenamiento local y la generación del informe de sesión. Esta etapa integra el funcionamiento lógico de dos módulos: el ESP32-S3 lector, encargado de la adquisición de sensores, y el ESP32 WROOM-32E receptor, encargado de la captura fotográfica, recepción de datos, almacenamiento en microSD, servidor web local y generación del reporte HTML. Los códigos principales implementados en ambos microcontroladores se presentan en los Anexos 2 y 3.

4.6.1. Arquitectura funcional del firmware

El sistema se organizó bajo un esquema emisor-receptor. El ESP32-S3 actúa como unidad lectora de sensores, controlando la selección de canales en los multiplexores y adquiriendo las señales analógicas provenientes de la cama de sensores. El ESP32 WROOM-32E actúa como unidad receptora y de control de sesión, gestionando la cámara OV2640, el botón físico de captura, la tarjeta microSD, la comunicación inalámbrica y la creación del informe final.

Esta separación permitió distribuir las tareas principales del prototipo. El módulo lector se concentra en la adquisición y organización de las lecturas, mientras que el módulo receptor coordina la secuencia de uso, valida las condiciones necesarias para registrar una sesión y consolida la información generada en un archivo HTML.

Arquitectura funcional del firmware

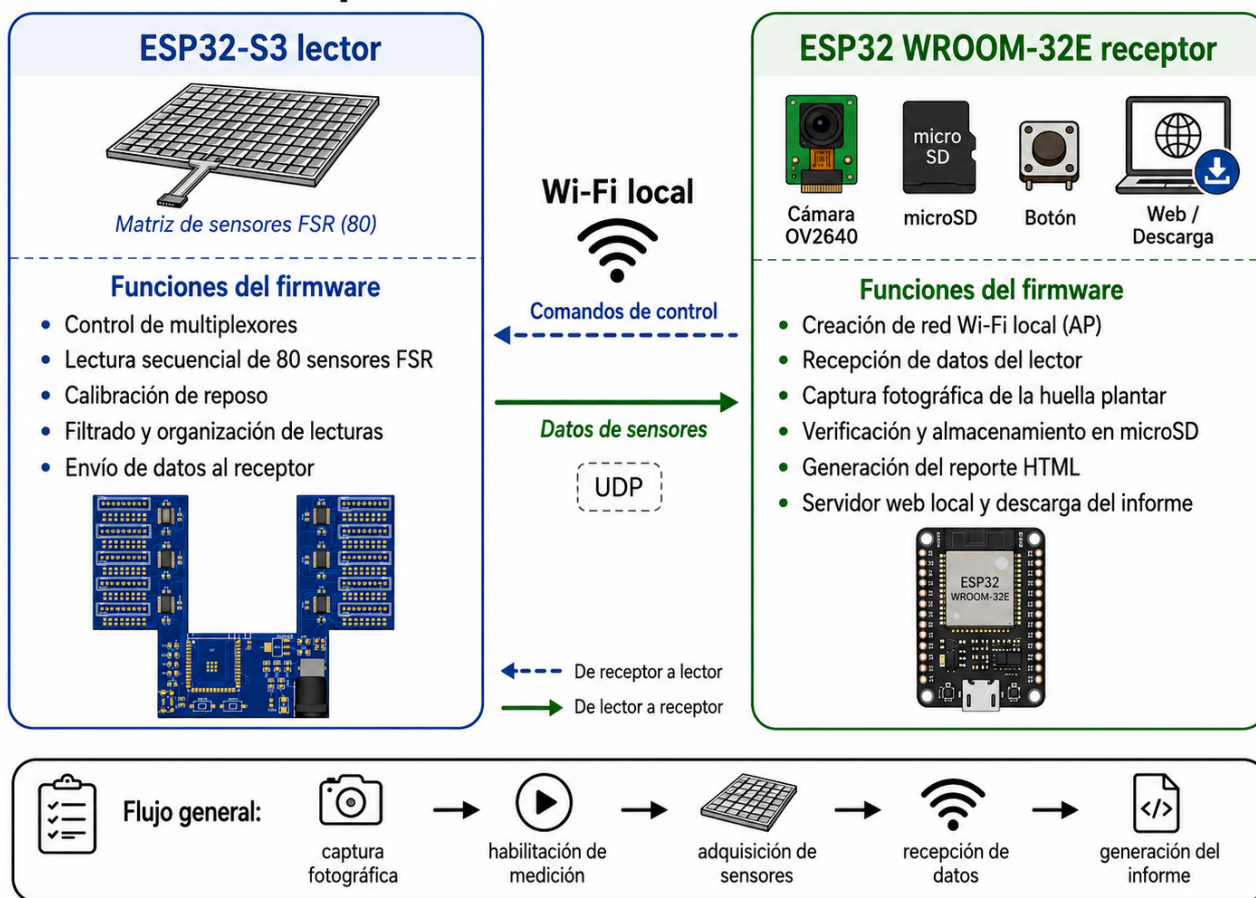


Figura 4.19: Arquitectura funcional del firmware, indicando la distribución de tareas entre el ESP32-S3 lector y el ESP32 WROOM-32E receptor.

4.6.2. Firmware del ESP32-S3 lector

El firmware del ESP32-S3 se encarga de recorrer secuencialmente los canales de los multiplexores y leer los valores asociados a los 80 sensores FSR. Para mejorar la estabilidad de las lecturas, se incorporaron tiempos de estabilización después de cada cambio de canal, descarte de lecturas iniciales y promediado de muestras antes de conservar el valor final de cada sensor.

Antes de iniciar una medición, el sistema realiza una calibración de reposo para establecer una

referencia inicial de cada canal. Posteriormente, las lecturas se procesan como cambios respecto a esa línea base, aplicando una zona muerta y criterios de filtrado para reducir activaciones residuales o respuestas poco significativas. Esta lógica mantiene la interpretación de los datos como valores relativos de apoyo y no como mediciones absolutas de presión.

El firmware conserva la organización física de la cama de sensores mediante dos matrices de 10 filas por 4 columnas, correspondientes al pie izquierdo y al pie derecho. Esta correspondencia permite que cada lectura quede asociada a su posición real dentro del cajón instrumentado y pueda representarse correctamente en el informe generado por el sistema.

4.6.3. Firmware del ESP32 receptor

El firmware del ESP32 receptor controla la secuencia principal de operación del prototipo. Al iniciar, verifica la disponibilidad de la cámara, la tarjeta microSD y la comunicación con el módulo lector. Cuando el sistema se encuentra listo, permanece en espera de la activación del botón físico por parte del personal tratante.

Al presionar el botón, el receptor captura la fotografía de la huella plantar sobre el vidrio superior y la almacena temporalmente. Solo después de la captura de la huella plantar se habilita la adquisición sobre la cama de sensores, enviando la orden correspondiente al ESP32-S3 lector. Esta condición evita generar informes incompletos y asegura que los datos registrados queden asociados a una referencia visual de la sesión.

Durante la etapa de medición, el receptor recibe los datos enviados por el ESP32-S3, valida que correspondan a una activación suficiente de la cama de sensores y almacena las muestras correspondientes al intervalo programado. Finalizada la adquisición, el sistema consolida la fotografía y las lecturas en un reporte HTML.

4.6.4. Comunicación inalámbrica entre módulos

La comunicación entre los dos microcontroladores se realiza mediante una red Wi-Fi local creada por el ESP32 receptor en modo Access Point. El ESP32-S3 lector se conecta a esta red como estación y transmite los datos adquiridos hacia el receptor mediante paquetes UDP estructurados.

El intercambio entre módulos utiliza mensajes de control y paquetes de datos. Los mensajes de control permiten habilitar o deshabilitar la medición sobre sensores, mientras que los paquetes de datos contienen las lecturas organizadas de los 80 puntos de sensado. Esta lógica permite que la medición sobre la cama de sensores solo se active cuando el receptor ha realizado previamente la captura fotográfica y ha autorizado el inicio del registro.

4.6.5. Control de estados e indicadores

El firmware utiliza indicadores LED para guiar la operación del prototipo durante la sesión. El LED rojo indica que el sistema está listo para realizar la captura fotográfica sobre el vidrio superior. Después de capturar la imagen y habilitar la medición, el LED azul indica que el usuario puede ubicarse sobre la cama de sensores.

Una vez finalizado el intervalo de adquisición, el sistema cierra la sesión, genera el reporte HTML y retorna al estado de espera para una nueva medición. Esta señalización permite que el personal tratante identifique de forma sencilla el momento correspondiente a cada etapa del procedimiento.

Cuadro 4.7: Estados principales indicados por el firmware durante la operación.

Estado del sistema	Interpretación durante la sesión
LED rojo encendido	Sistema listo para realizar la captura fotográfica inicial.
LED azul encendido	Captura realizada y medición sobre cama de sensores habilitada.
Indicadores apagados o en transición	Sistema procesando información, esperando condiciones válidas o cerrando la sesión.

El LED azul indica que la captura fotográfica fue realizada y que la medición sobre la cama de sensores quedó habilitada. Sin embargo, la ventana de adquisición de cinco segundos no inicia necesariamente en el instante en que se enciende este indicador, sino cuando el firmware detecta la condición de activación definida para el apoyo sobre los sensores.

La versión ampliada del esquemático de conexión de los LEDs indicadores y del botón de captura del ESP32 receptor se presenta en el Anexo 7. En este se documenta que ambos LEDs comparten el pin TXD debido a la disponibilidad limitada de pines, mientras que el botón de captura se conecta entre RXD y GND.

4.6.6. Almacenamiento local y descarga del informe

El almacenamiento principal del sistema se realiza en una tarjeta microSD conectada al ESP32 receptor. Para cada sesión válida, el firmware crea una carpeta y un archivo HTML asociado, en el cual se integran la fotografía capturada, las lecturas de los sensores y la representación visual de las dos matrices de apoyo plantar.

La tarjeta microSD conserva todos los informes generados durante las diferentes sesiones, por lo que la fisioterapeuta puede acceder posteriormente al historial completo de mediciones almacenadas. Cada informe queda organizado de forma independiente dentro de la memoria, permitiendo consultar, copiar o respaldar los registros acumulados cuando sea necesario.

Además del almacenamiento local en microSD, el receptor habilita un servidor web dentro de la red Wi-Fi creada por el propio dispositivo. La red local generada por el prototipo se identificó con el nombre FSR_LOGGER y se configuró con la contraseña 12345678. El acceso a la interfaz web se realiza desde un navegador mediante la dirección <http://192.168.4.1/>. Esta funcionalidad está orientada a facilitar la descarga inmediata del informe más reciente durante la operación habitual del sistema, sin requerir conexión a Internet.

La interfaz web local permite verificar el estado de la cámara, la memoria microSD, la comunicación con el módulo lector y la fecha/hora registrada por el receptor. Desde esta misma página,

el usuario puede sincronizar la fecha y hora del sistema antes de realizar la sesión o descargar el informe, con el fin de que los reportes generados queden asociados a una marca temporal correcta.

El botón *Descargar último informe* permite descargar únicamente el último informe registrado y reconocido por el sistema. Después de reiniciar el ESP32 receptor, el informe disponible desde la interfaz web puede corresponder únicamente al generado desde el último encendido. Esta condición no elimina los registros anteriores, ya que todos los informes permanecen almacenados en la tarjeta microSD, que funciona como medio principal de almacenamiento y como repositorio completo de las sesiones realizadas.

Receptor NeuroPrematuros

Panel local para sincronizar fecha/hora y descargar el ultimo informe guardado en la microSD.

Camara
OK

MicroSD
OK

Comunicacion con emisora
OK

Fecha/hora del receptor
04/07/2026 23:01:35

Fecha y hora actualizadas correctamente.

Descarga del informe

Cuando termine la medicion y el LED rojo vuelva a encender, presione el boton para guardar una copia del informe en el computador.

Ultimo reporte finalizado: Ninguno desde el ultimo encendido

Descargar ultimo informe **Actualizar hora**

Uso recomendado

1. Conecte el computador al WiFi **FSR_LOGGER**.
2. Abra esta pagina: **<http://192.168.4.1/>**. La fecha/hora se sincroniza sola.
3. Espere el LED rojo: indica que el sistema esta listo para tomar la foto sobre el vidrio.
4. Presione el boton fisico del prototipo para tomar la foto.
5. Cuando se encienda el LED azul, el niño puede pasar a la cama de sensores.
6. Cuando el LED azul se apague y vuelva el LED rojo, el informe ya esta cerrado y puede descargarse.

La microSD sigue siendo el almacenamiento principal. Esta pagina solo permite descargar una copia al computador.

Figura 4.20: Interfaz web local del ESP32 receptor para verificación del sistema, sincronización de fecha/hora y descarga del último informe generado.

El uso de HTML como formato de salida permite consultar cada resultado desde un navegador web convencional. Los informes almacenados presentan la imagen de referencia, las matrices izquier-

da y derecha, los valores numéricos por sensor y una visualización por rangos de color para facilitar la revisión del patrón relativo de apoyo. En conjunto, la descarga inalámbrica permite obtener de manera práctica el informe más reciente reconocido por la interfaz web, mientras que la tarjeta microSD conserva el acceso a todos los informes generados por el sistema.

4.6.7. Alcance del procesamiento y visualización

El procesamiento implementado organiza las lecturas adquiridas por la cama de sensores, aplica los criterios de filtrado definidos en el firmware y conserva la correspondencia entre cada canal electrónico y su posición dentro de las matrices izquierda y derecha.

A partir de estas lecturas, el sistema genera una representación numérica y gráfica del apoyo registrado durante la sesión. El informe HTML integra la fotografía inicial, la distribución espacial de los puntos activados y la visualización por rangos de color, facilitando la identificación de las zonas con mayor y menor nivel de apoyo relativo.

La finalidad de esta etapa es presentar la información de manera ordenada y comprensible para complementar la revisión realizada por la fisioterapeuta. De esta forma, el reporte conserva la trazabilidad entre la ubicación física de los sensores, los datos procesados y su representación final dentro del informe.

4.6.8. Flujo general de operación del sistema

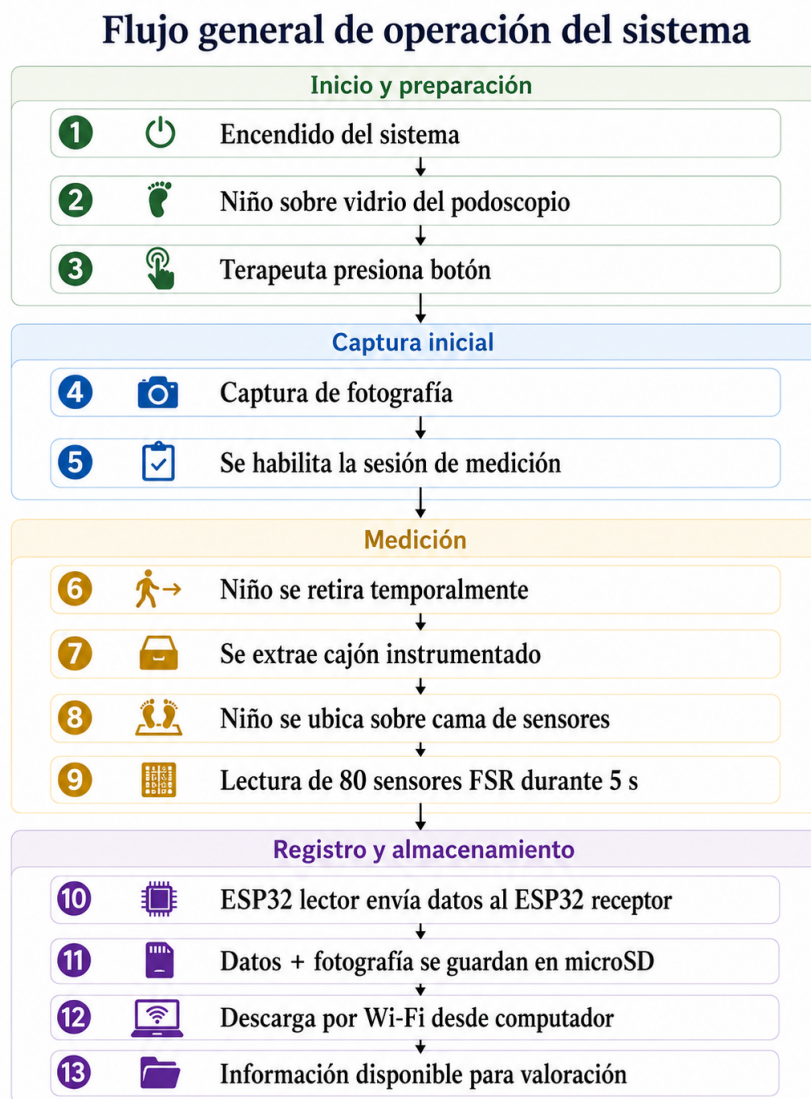


Figura 4.21: Flujo general de operación del sistema durante una sesión de registro del apoyo plantar.

Pruebas y evaluación del prototipo

5.1. Alcance de las pruebas realizadas

Las pruebas del prototipo se realizaron para comprobar el funcionamiento de los subsistemas principales antes y después de su integración final. La verificación se organizó por bloques funcionales: pruebas mecánicas, pruebas de alimentación y seguridad eléctrica, prueba de cámara e iluminación, pruebas de sensores FSR, pruebas de comunicación y firmware, pruebas de almacenamiento y descarga del informe, y prueba funcional integrada del sistema.

Estas pruebas no corresponden a una calibración metrológica ni a una validación clínica. Su propósito fue revisar el funcionamiento técnico del prototipo, la coherencia entre los elementos físicos y la información visualizada, la generación correcta de registros y la integración del sistema al flujo de trabajo previsto.

5.2. Pruebas mecánicas

Las pruebas mecánicas se realizaron para verificar que la estructura del podoscopio, el vidrio superior y el cajón inferior conservaran estabilidad durante el uso previsto. Estas pruebas permitieron revisar que el sistema soportara una carga superior a la esperada para la población objetivo y que el cajón pudiera desplazarse sin interferencias mecánicas.

5.2.1. Prueba de carga estructural

Como parte de la verificación mecánica, se realizó una prueba de carga estática para evaluar la estabilidad del podoscopio, el comportamiento de la estructura de madera y la integridad del vidrio superior. La carga de referencia se estableció en aproximadamente 50 kg, de acuerdo con la información suministrada por el centro terapéutico sobre el peso esperado de la población infantil potencialmente beneficiaria del prototipo.

La carga evaluada puede expresarse aproximadamente como una fuerza de:

$$F = mg = 50 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 490,5 \text{ N.} \quad (5.1)$$

Para realizar la prueba, se ubicaron pesas sobre la superficie superior del podoscopio hasta alcanzar una masa total aproximada de 50 kg. La aplicación de la carga se efectuó de manera supervisada, observando progresivamente el comportamiento del vidrio, la estructura de madera, las uniones y los puntos de apoyo.

La evaluación se realizó mediante una rúbrica de inspección visual y funcional. Los criterios de aceptación establecidos fueron los siguientes:

- conservación de la estabilidad general de la estructura, sin desplazamientos, inclinaciones ni balanceo;
- ausencia de fracturas, fisuras o desprendimientos en el vidrio y en los elementos de madera;
- ausencia de hundimiento, flexión visible excesiva o cedencia permanente de las superficies estructurales;
- conservación de la posición del vidrio superior y de su apoyo sobre el marco;
- ausencia de separación o aflojamiento visible en las uniones y puntos de soporte;
- mantenimiento de la geometría general de la estructura durante la aplicación de la carga;
- ausencia de deformaciones residuales después de retirar las pesas; y
- conservación del funcionamiento normal de los elementos mecánicos del prototipo después de la prueba.

La carga se consideró satisfactoriamente soportada cuando todos los criterios anteriores se mantuvieron durante la prueba y después de retirar el peso. Esta metodología permitió establecer 50 kg como la carga máxima verificada experimentalmente durante la evaluación realizada, sin interpretarla como la carga límite de rotura de la estructura.



(a) Prueba de carga sobre la estructura del podoscopio.



(b) Verificación de la masa aplicada mediante balanza.

Figura 5.1: Prueba de carga estructural del podoscopio y del vidrio superior con una masa aproximada de 50 kg.

Durante la aplicación de la carga no se observaron desplazamientos, inclinaciones, fracturas, desprendimientos ni deformaciones visibles permanentes en la estructura de madera, el vidrio superior o los puntos de apoyo. Después de retirar las pesas, la estructura conservó su geometría y estabilidad, sin evidenciar deformación residual o afectación funcional.

Con base en estos resultados, se verificó experimentalmente que el prototipo soporta una carga estática aproximada de 50 kg bajo las condiciones evaluadas. Este valor se adopta como límite de uso seguro del prototipo y debe respetarse durante su operación supervisada.

5.2.2. Prueba de estabilidad y desplazamiento del cajón

Adicionalmente, se revisó el desplazamiento del cajón inferior instrumentado, verificando que pudiera extraerse y cerrarse sin obstrucciones. Esta prueba fue necesaria porque el cajón constituye la zona donde se ubica la cama de sensores y debe permitir la transición entre la captura fotográfica inicial y la medición sobre sensores.

El criterio de aceptación fue que el cajón conservara estabilidad durante su extracción, que no presentara bloqueo mecánico y que el cableado interno no interfiriera con su desplazamiento. La prueba permitió confirmar que el cajón podía operar como módulo integrado de sensado sin afectar la estructura general del podoscopio.

5.3. Pruebas de alimentación y seguridad eléctrica

Las pruebas de alimentación y seguridad eléctrica se realizaron para verificar que el prototipo recibiera energía correctamente, distribuyera los niveles de tensión requeridos por sus módulos electrónicos y no presentara condiciones visibles de riesgo durante la operación. Estas pruebas incluyeron la verificación de la tensión y corriente de entrada en corriente alterna, la salida de alimentación en corriente continua, el encendido y apagado del sistema, el aislamiento interno y externo, y la protección mediante fusible.

Debido a que el prototipo incorpora una entrada conectada a la red eléctrica y módulos electrónicos alimentados en baja tensión, estas pruebas se realizaron antes de ejecutar la secuencia funcional completa del sistema. Su propósito fue revisar la correcta conexión, distribución, aislamiento y operación de la etapa de alimentación, sin constituir una certificación eléctrica formal.

5.3.1. Prueba de entrada de alimentación a 120 V AC

La primera prueba consistió en verificar la tensión de entrada del prototipo al conectarlo a la red eléctrica. Para ello, se utilizó un multímetro digital configurado para la medición de tensión en corriente alterna, comprobando que el conector principal recibiera una tensión aproximada de 120 V AC.

El criterio de aceptación fue confirmar la presencia de la tensión de red en la entrada del sistema, sin evidenciar falsos contactos, interrupciones o comportamiento anormal en el punto de conexión principal.

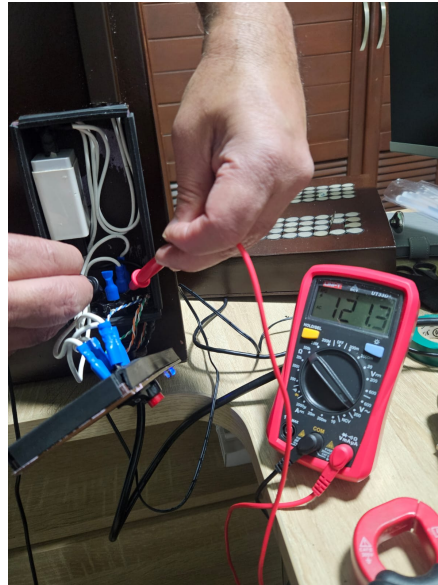


Figura 5.2: Verificación de la tensión de entrada aproximada de 120 V AC en el conector principal del prototipo.

Esta prueba permitió comprobar que el sistema recibía el nivel de alimentación esperado desde la red eléctrica antes de distribuir energía hacia las etapas internas del prototipo.

5.3.2. Medición de corriente en la entrada AC

Después de verificar la tensión de entrada, se midió la corriente consumida por el prototipo durante su funcionamiento. Para ello, se utilizó una pinza voltiamperimétrica configurada para la medición de corriente alterna y ubicada alrededor de uno de los conductores de alimentación.

La primera medición se realizó con el sistema completo encendido, incluyendo la tira de iluminación LED y los módulos electrónicos. En esta condición se obtuvo una corriente total aproximada de 0,10 A AC.

Posteriormente, se midió de manera independiente la corriente correspondiente a la tira de iluminación LED, obteniéndose un valor aproximado de 0,07 A AC. Ambas mediciones se utilizaron para realizar un balance aproximado de potencia y estimar el consumo correspondiente a la etapa electrónica alimentada en corriente continua.



(a) Corriente total consumida por el sistema:
0,10 A AC.



(b) Corriente consumida por la tira de iluminación
LED: 0,07 A AC.

Figura 5.3: Mediciones de corriente alterna realizadas con pinza voltiamperimétrica.

El criterio de aceptación fue comprobar que la corriente demandada durante la operación normal permaneciera por debajo del valor nominal del fusible instalado y que no se observaran variaciones anormales durante la medición.

5.3.3. Estimación del consumo de la etapa DC

Para estimar la corriente consumida conjuntamente por los dos microcontroladores y los módulos electrónicos asociados, se planteó un balance simplificado de potencia entre la entrada y las salidas de la caja eléctrica.

La potencia de entrada se consideró aproximadamente igual a la suma de la potencia consumida por la tira de iluminación LED, la potencia entregada a la etapa de corriente continua y las pérdidas internas de conversión:

$$P_{\text{ent}} \approx P_{\text{LED}} + P_{\text{DC}} + P_{\text{perd}} \quad (5.2)$$

Para esta estimación se consideraron despreciables las pérdidas internas de la etapa de conversión:

$$P_{\text{perd}} \approx 0 \quad (5.3)$$

Debido a que no se midieron directamente el factor de potencia de las cargas ni la eficiencia del convertidor, se adoptó para el cálculo un factor de potencia cercano a la unidad y se utilizó la relación aproximada:

$$P \approx VI \quad (5.4)$$

La potencia aproximada demandada por el sistema completo se calculó a partir de la tensión de entrada y de la corriente total medida:

$$P_{\text{ent}} \approx V_{\text{AC}} I_{\text{AC, total}} \quad (5.5)$$

$$\approx (120 \text{ V})(0,10 \text{ A}) \quad (5.6)$$

$$\approx 12 \text{ W} \quad (5.7)$$

De manera equivalente, la potencia aproximada consumida por la tira de iluminación LED fue:

$$P_{\text{LED}} \approx V_{\text{AC}} I_{\text{AC, LED}} \quad (5.8)$$

$$\approx (120 \text{ V})(0,07 \text{ A}) \quad (5.9)$$

$$\approx 8,4 \text{ W} \quad (5.10)$$

Al sustituir estos resultados en el balance de potencia de la Ecuación 5.2, se obtuvo la potencia estimada correspondiente a la etapa de corriente continua:

$$P_{\text{DC}} \approx P_{\text{ent}} - P_{\text{LED}} \quad (5.11)$$

$$\approx 12 \text{ W} - 8,4 \text{ W} \quad (5.12)$$

$$\approx 3,6 \text{ W} \quad (5.13)$$

Considerando una tensión de salida de 5 V DC, la corriente total estimada de los dos microcontroladores y sus módulos asociados se calculó mediante:

$$I_{\text{DC}} \approx \frac{P_{\text{DC}}}{V_{\text{DC}}} \quad (5.14)$$

$$\approx \frac{3,6 \text{ W}}{5 \text{ V}} \quad (5.15)$$

$$\approx 0,72 \text{ A DC} \quad (5.16)$$

Por lo tanto, bajo las condiciones evaluadas y los supuestos utilizados en el balance, la etapa electrónica presentó un consumo conjunto estimado de 0,72 A DC. Este valor corresponde a una estimación indirecta obtenida a partir de las mediciones realizadas en corriente alterna y no a una medición directa sobre la salida de 5 V DC.

5.3.4. Prueba de alimentación DC para los microcontroladores

Después de verificar la entrada de red y estimar el consumo de la etapa electrónica, se comprobó la salida de alimentación en corriente continua destinada a los módulos del sistema. Esta prueba permitió revisar que la salida del cargador o módulo de conversión entregara una tensión aproximada de 5 V DC, correspondiente al nivel de alimentación requerido por los dispositivos empleados.

El criterio de aceptación fue obtener una tensión cercana a 5 V DC en las salidas destinadas a la PCB de adquisición y al ESP32 receptor, sin inversión de polaridad ni interrupciones visibles durante la medición.

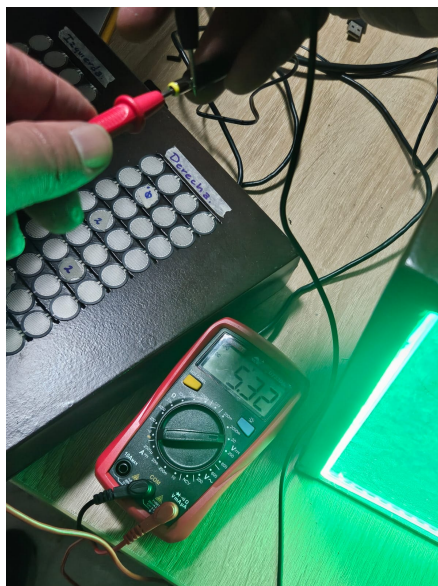


Figura 5.4: Verificación de la salida de alimentación aproximada de 5 V DC para los microcontroladores del prototipo.

Con esta prueba se verificó que la etapa de conversión y distribución de baja tensión entregara el nivel requerido para energizar los módulos electrónicos principales del sistema.

5.3.5. Estimación de la corriente máxima de entrada

Adicionalmente, se estimó la corriente máxima que podría demandar el prototipo en la entrada de corriente alterna si la salida del cargador (módulo rectificador que alimenta a ambos microcontroladores) operara a su capacidad nominal máxima de 5 V y 3,4 A.

La potencia máxima que podría ser entregada por la salida de corriente continua se calculó mediante:

$$P_{DC,max} = V_{DC}I_{DC,max} \quad (5.17)$$

$$= (5 \text{ V})(3,4 \text{ A}) \quad (5.18)$$

$$= 17 \text{ W} \quad (5.19)$$

Al sumar la potencia aproximada correspondiente a la tira de iluminación LED, se obtuvo la potencia total máxima estimada:

$$P_{ent,max} \approx P_{LED} + P_{DC,max} \quad (5.20)$$

$$\approx 8,4 \text{ W} + 17 \text{ W} \quad (5.21)$$

$$\approx 25,4 \text{ W} \quad (5.22)$$

La corriente máxima estimada en la entrada de 120 V AC fue entonces:

$$I_{AC,max} \approx \frac{P_{ent,max}}{V_{AC}} \quad (5.23)$$

$$\approx \frac{25,4 \text{ W}}{120 \text{ V}} \quad (5.24)$$

$$\approx 0,212 \text{ A AC} \quad (5.25)$$

Este resultado representa una condición teórica en la cual el cargador entrega su corriente nominal máxima. Durante las pruebas normales, la corriente medida del sistema completo fue de 0,10 A AC, inferior a la corriente máxima estimada de 0,212 A AC.

5.3.6. Prueba de encendido y apagado del sistema

La prueba de encendido y apagado se realizó para revisar el comportamiento del prototipo durante ciclos repetidos de activación y desactivación. Esta verificación permitió observar si el sistema presentaba fallos de conexión, interrupciones, reinicios anómalos, chisporroteo visible o variaciones que pudieran afectar la electrónica durante la operación.

El criterio de aceptación fue que el sistema encendiera y apagara de forma estable mediante el interruptor principal, sin señales visibles de falla eléctrica ni comportamiento irregular en los módulos conectados.

La evidencia audiovisual correspondiente al encendido y apagado del prototipo se presenta en el Anexo 6, en la evidencia denominada *Prueba de alimentación*.

Esta prueba permitió verificar funcionalmente que la alimentación del prototipo respondiera de manera estable durante la activación y desactivación normal del sistema.

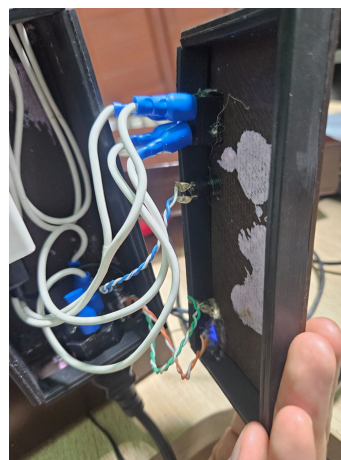
5.3.7. Prueba de aislamiento interno

La prueba de aislamiento interno se realizó mediante inspección visual de la caja eléctrica y de las conexiones alojadas dentro de la estructura del prototipo. El objetivo fue verificar que los conductores, empalmes y puntos de conexión permanecieran cubiertos, organizados y sin partes conductoras expuestas en el interior del sistema.

El criterio de aceptación fue que las conexiones internas estuvieran protegidas dentro de la caja eléctrica o mediante elementos aislantes, evitando contactos accidentales entre conductores, empalmes expuestos o posibles puntos de cortocircuito durante la operación.



(a) Vista interna de la caja eléctrica del prototipo.



(b) Detalle del aislamiento y organización de las conexiones internas.

Figura 5.5: Verificación del aislamiento interno de la etapa de alimentación del prototipo.

Esta revisión permitió confirmar que la etapa de alimentación se encontraba contenida dentro de la estructura y que las conexiones internas no quedaban expuestas durante el uso normal del sistema.

5.3.8. Prueba de aislamiento externo

La prueba de aislamiento externo se realizó para verificar que las superficies accesibles del prototipo no presentaran componentes conductores expuestos, cables sueltos o elementos eléctricos peligrosos para el usuario durante la operación. La revisión incluyó la zona del cajón instrumentado, la cama de sensores, la estructura exterior y el panel de control.

El criterio de aceptación fue que el usuario solamente tuviera contacto con las superficies destinadas al apoyo y operación del sistema, sin acceso directo a conductores, empalmes, terminales o puntos energizados.

La evidencia audiovisual correspondiente a la revisión del aislamiento externo del prototipo se presenta en el Anexo 6, en la evidencia denominada *Prueba de aislamiento externo*.

Esta prueba permitió verificar que, desde el exterior, el sistema no presentara elementos eléctricos expuestos que pudieran representar un riesgo durante la manipulación o durante la sesión de medición.

5.3.9. Dimensionamiento y verificación del fusible de 0,5 A

La protección ante condiciones de sobrecorriente se implementó mediante un fusible de 0,5 A instalado en la entrada de alimentación del prototipo. Su selección se sustentó en la corriente medida durante la operación normal y en la corriente máxima estimada para la condición de mayor demanda de la etapa electrónica.

Durante la prueba del sistema completo se registró una corriente aproximada de 0,10 A AC, como se presentó en la Figura 5.3. Por otra parte, considerando el funcionamiento de la salida DC a su capacidad máxima de 5 V y 3,4 A, se estimó una corriente máxima de entrada de 0,212 A AC, de acuerdo con la Ecuación 5.25.

La relación entre la corriente nominal del fusible instalado y la corriente máxima estimada fue:

$$M = \frac{I_{\text{fusible}}}{I_{\text{AC,max}}} \quad (5.26)$$

$$= \frac{0,5 \text{ A}}{0,212 \text{ A}} \quad (5.27)$$

$$\approx 2,36 \quad (5.28)$$

Por lo tanto, la corriente nominal del fusible instalado es aproximadamente 2,36 veces superior a la corriente máxima de operación estimada. Este margen permite que el sistema funcione sin que el fusible abra el circuito durante la operación prevista.

A partir de estos resultados, se determinó que un fusible de 0,5 A es suficiente para las condiciones de funcionamiento evaluadas, debido a que su corriente nominal supera tanto la corriente medida de 0,10 A AC como la corriente máxima estimada de 0,212 A AC.

El criterio de aceptación fue comprobar que el fusible de 0,5 A estuviera correctamente instalado en serie con la entrada de alimentación y que su corriente nominal fuera superior a la máxima corriente prevista durante el funcionamiento del prototipo.



Figura 5.6: Verificación del fusible de 0,5 A instalado en el conector de entrada de alimentación del prototipo.

La verificación se realizó de manera funcional y no destructiva. No se provocaron cortocircuitos ni condiciones intencionales de sobrecorriente para producir la apertura del fusible. En consecuencia, la prueba confirmó su presencia, correcta instalación y correspondencia con la corriente de operación calculada, pero no evaluó experimentalmente su curva de actuación ni el tiempo requerido para interrumpir una condición de falla.

5.3.10. Resumen de resultados de alimentación

Los principales valores obtenidos mediante las mediciones y estimaciones realizadas se presentan en la Tabla 5.1.

Cuadro 5.1: Resultados de las pruebas y cálculos de alimentación del prototipo.

Parámetro	Resultado
Tensión de entrada	120 V AC
Corriente total medida	0,10 A AC
Corriente medida de la tira LED	0,07 A AC
Potencia aproximada de entrada	12 W
Potencia aproximada de la tira LED	8,4 W
Potencia estimada de la etapa DC	3,6 W
Corriente total estimada en DC	0,72 A DC
Corriente máxima estimada en AC	0,212 A AC
Fusible instalado	0,5 A
Relación fusible/corriente máxima	2,36

Los resultados permitieron comprobar que el prototipo operaba con una corriente de entrada inferior a la corriente máxima prevista y que el fusible de 0,5 A proporcionaba un margen adecuado para las condiciones de funcionamiento evaluadas.

5.4. Prueba funcional de cámara e iluminación

La prueba de cámara se realizó para verificar que el módulo OV2640 capturara una imagen útil de la huella plantar sobre el vidrio superior del podoscopio. Esta prueba también permitió revisar que la iluminación interna del sistema facilitara la visualización del contacto plantar durante la captura inicial.

El criterio de aceptación fue que la imagen obtenida permitiera observar la huella plantar dentro del área del vidrio, sin recortes relevantes de la zona de apoyo y con una iluminación suficiente para su revisión posterior. Esta imagen se utilizó como referencia visual complementaria dentro del reporte de sesión.

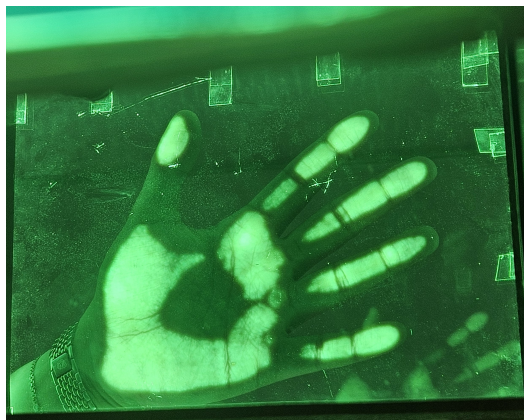


Figura 5.7: Prueba de captura fotográfica de huella e iluminación interna del podoscopio.

5.5. Pruebas funcionales de sensores FSR

Las pruebas funcionales de sensores FSR se realizaron para verificar la respuesta de los 80 puntos de sensado y la correspondencia entre la activación física de cada sensor y su representación en la visualización del sistema.

5.5.1. Pruebas individuales de sensores

En las pruebas individuales se aplicó carga puntual sobre cada sensor FSR y se observó si la lectura cambiaba en la posición correspondiente de la matriz. Esta verificación permitió identificar sensores activos, revisar continuidad en las conexiones y comprobar la correspondencia entre sensor físico, conector, canal de lectura y posición visualizada.

El criterio de aceptación fue que cada sensor respondiera ante la aplicación de carga y que su activación se reflejara en la posición esperada dentro de la matriz correspondiente. Cuando se identificaron inconsistencias, se revisó la conexión física entre el sensor, el cableado, el conector y el canal de adquisición.

5.5.2. Pruebas por matriz

Después de revisar sensores individuales, se realizaron pruebas sobre la matriz izquierda y la matriz derecha. En esta etapa se aplicaron cargas en diferentes zonas de cada matriz, verificando que la respuesta visual coincidiera con la zona física activada.

El criterio de aceptación fue que la matriz representada en el sistema conservara la misma organización física de la cama de sensores. Esta prueba permitió revisar la coherencia espacial entre la distribución real de los sensores sobre el cajón instrumentado y su representación en el reporte generado.

La evidencia audiovisual correspondiente a la activación y respuesta de los sensores FSR, incluyendo pruebas individuales y por matriz, se presenta en el Anexo 6, en la evidencia denominada *Prueba de sensores*.

5.6. Pruebas de comunicación, firmware y operación integrada

Las pruebas de comunicación, firmware y operación integrada se realizaron para verificar que el prototipo ejecutara correctamente la secuencia completa de funcionamiento. Estas pruebas incluyeron la captura fotográfica, la habilitación de la medición sobre sensores, la lectura de los 80 FSR, la comunicación entre el ESP32-S3 lector y el ESP32 receptor, el almacenamiento en microSD, la generación del reporte HTML y la descarga del informe mediante Wi-Fi local.

Las evidencias audiovisuales correspondientes a la operación integrada del prototipo se presentan en el Anexo 6, en la evidencia denominada *Pruebas funcionales del sistema*.

5.6.1. Verificación de comunicación y control del firmware

Se verificó que el ESP32-S3 lector enviara correctamente las lecturas adquiridas al ESP32 receptor, conservando la organización de dos matrices independientes de 10 filas por 4 columnas. También se comprobó que la medición sobre sensores solo se habilitara después de realizar una captura fotográfica válida, evitando generar registros sin una imagen de referencia asociada.

Durante la prueba se revisó el comportamiento de los indicadores LED, verificando que estos permitieran identificar los estados principales del sistema, como espera de captura, medición habilitada, adquisición de datos y cierre de sesión.

5.6.2. Verificación de almacenamiento y reporte HTML

Se comprobó que, al finalizar una sesión válida, el sistema almacenara en la microSD la fotografía capturada, las lecturas de los sensores y la visualización de las matrices dentro de un reporte HTML integrado.

El criterio de aceptación fue que el archivo generado pudiera abrirse desde un navegador web y que incluyera la información principal de la sesión: imagen de referencia, matriz izquierda, matriz derecha, valores numéricos y visualización por rangos de color.

5.6.3. Verificación de descarga por Wi-Fi local

Se verificó que el ESP32 receptor habilitara una red Wi-Fi local denominada FSR_LOGGER, protegida con la contraseña 12345678, y una interfaz web accesible desde la dirección <http://192.168.4.1/>. Esta interfaz permitió revisar el estado de los módulos, sincronizar la fecha y hora del sistema y acceder al último informe generado, sin requerir conexión a Internet. La prueba se realizó desde un computador y desde un teléfono celular.

En ambos casos, el dispositivo se conectó directamente a la red Wi-Fi creada por el prototipo y accedió a la interfaz local mediante un navegador web. Desde el computador se realizó la descarga del

reporte HTML mediante el botón *Descargar último informe*, mientras que desde el teléfono celular se verificó la correcta visualización del entorno de descarga y el acceso a la información disponible desde la interfaz web.

El criterio de aceptación fue que la interfaz web pudiera abrirse correctamente desde ambos tipos de dispositivo, que la sincronización de fecha y hora pudiera realizarse desde la página local y que el archivo disponible correspondiera al último informe finalizado y reconocido por el sistema. La interfaz web local utilizada para esta función se presentó previamente en la Figura 4.20.

Se tuvo en cuenta que el botón *Descargar último informe* permite descargar únicamente el último reporte registrado y reconocido por el receptor. Después de reiniciar el ESP32 receptor, el informe disponible desde la interfaz web puede corresponder únicamente al generado desde el último encendido; sin embargo, los informes anteriores permanecen almacenados en la tarjeta microSD, que conserva el historial completo de sesiones generadas.

La evidencia audiovisual correspondiente al acceso desde teléfono celular se presenta en el Anexo 6, en la evidencia denominada *Prueba de acceso desde teléfono celular*.

5.6.4. Resultado de la prueba integrada

La prueba integrada permitió comprobar que los subsistemas mecánico, electrónico, de captura, sensado, comunicación, almacenamiento y descarga operan de forma coordinada. El sistema completó la secuencia funcional sin interrupciones, generó el reporte HTML de la sesión y permitió su revisión posterior desde la microSD o mediante descarga Wi-Fi local.

5.7. Criterios generales de estabilidad, repetibilidad y coherencia

Los criterios de estabilidad, repetibilidad y coherencia se evaluaron de forma funcional durante las pruebas al sistema. La estabilidad se revisó observando que, sin carga aplicada, las lecturas no generaran activaciones relevantes. La repetibilidad se comprobó aplicando cargas similares sobre una misma zona y verificando que la respuesta mantuviera una tendencia comparable. La coherencia se evaluó confirmando que la zona activada físicamente coincidiera con la zona representada en el reporte.

En conjunto, las pruebas permitieron comprobar que el prototipo adquiere lecturas relativas desde la cama de sensores, conserva la correspondencia entre sensores y visualización, realiza la captura fotográfica, almacena la información en microSD, genera el reporte HTML integrado y permite descargar el informe mediante la red Wi-Fi local.

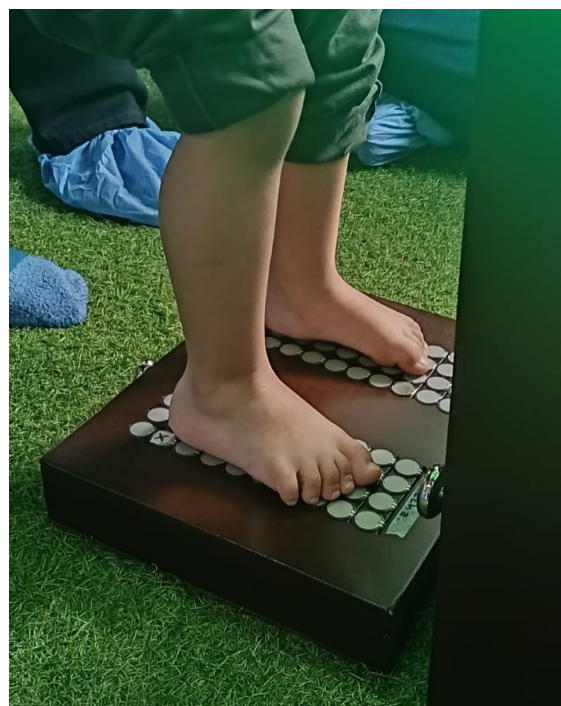
5.8. Evaluación de usabilidad e integración al flujo terapéutico

La evaluación de usabilidad se realizó mediante una reunión de revisión con la fisioterapeuta María del Mar Marulanda. El propósito fue conocer su percepción sobre la facilidad de uso del prototipo, la claridad del reporte generado y su posible integración al flujo terapéutico del centro.

Adicionalmente, se realizó una comprobación puntual del funcionamiento del prototipo dentro del flujo terapéutico del centro, bajo supervisión del personal tratante. Esta revisión permitió observar la secuencia de uso del sistema en el entorno previsto, incluyendo la ubicación del usuario, la operación guiada del prototipo y la consulta posterior de la información generada. La Figura 5.8 presenta evidencia fotográfica de esta comprobación.



(a) Ubicación supervisada del usuario durante la prueba.



(b) Operación del prototipo en el entorno terapéutico.

Figura 5.8: Comprobación del funcionamiento del prototipo dentro del flujo terapéutico del centro.

La comprobación del funcionamiento del prototipo dentro del flujo terapéutico se realizó como una prueba puntual, supervisada y autorizada mediante consentimiento informado. Este documento permitió dejar constancia de la autorización para la participación en la prueba de campo y se presenta en el Anexo 8. La evidencia audiovisual asociada a esta comprobación se presenta en el Anexo 6, en la evidencia denominada *Comprobación del funcionamiento en flujo terapéutico*.

5.8.1. Retroalimentación del personal tratante

Durante la revisión se consideraron tres aspectos principales: facilidad de operación, claridad de la información presentada y utilidad del registro generado. La fisioterapeuta indicó que el sistema resultaba práctico y que la integración de la captura fotográfica con la visualización de los puntos de apoyo facilitaba la revisión posterior de cada sesión.

También señaló que el reporte HTML era adecuado porque permite consultar la información desde un navegador y compartirla con otros especialistas cuando sea necesario.

5.8.2. Integración al flujo de trabajo

Según la retroalimentación recibida, el prototipo puede integrarse como herramienta de apoyo al procedimiento de valoración, ya que conserva una referencia visual de la huella plantar y agrega información relativa del apoyo mediante sensores. Esta información puede servir como insumo complementario para el análisis del apoyo plantar y para orientar decisiones posteriores del personal tratante.

Resultados y Discusión

6.1. Resultados principales

Los resultados obtenidos evidencian que el prototipo completó satisfactoriamente una sesión funcional de registro del apoyo plantar, integrando la captura fotográfica sobre el vidrio, la lectura relativa de los 80 sensores FSR, el almacenamiento de la información en la memoria microSD, la generación automática del informe HTML y su descarga mediante la red Wi-Fi local habilitada por el sistema.

La verificación realizada permitió comprobar que el prototipo genera un registro organizado y consultable, en el cual se relacionan la fotografía obtenida al inicio de la sesión, las lecturas correspondientes a las matrices izquierda y derecha, la visualización mediante colores y porcentajes relativos, y el resumen técnico de la medición.

En la Figura 6.1 se presenta el prototipo final completamente ensamblado, incluyendo la estructura superior con vidrio, el sistema de iluminación, el cajón instrumentado, las matrices de sensores y los elementos de operación del sistema.



Figura 6.1: Prototipo final de la plataforma baropodométrica infantil completamente ensamblado.

El informe HTML completo utilizado como evidencia de los resultados se presenta como archivo digital descargable en el Anexo 9. Para visualizar correctamente su contenido, el archivo debe descargarse y abrirse localmente desde un navegador web.

Adicionalmente, la estimación económica estableció un valor total aproximado de \$3.419.289 COP para la reproducción del prototipo, incluyendo materiales disponibles previamente y actividades realizadas por los autores. Este valor resultó inferior al de las referencias comerciales consideradas en el análisis.

6.2. Resumen de resultados de las pruebas

En el Cuadro 6.1 se sintetizan los principales resultados obtenidos durante las pruebas mecánicas, eléctricas, electrónicas, funcionales y de operación integrada del prototipo.

Cuadro 6.1: Resumen de resultados obtenidos en las pruebas del prototipo.

Prueba	Resultado obtenido	Evidencia
Pruebas mecánicas	La estructura soportó una carga aproximada de 50 kg sin presentar deformaciones, fracturas, inclinaciones o desplazamientos visibles.	Fotografías de la prueba.
Pruebas de alimentación	Se verificó una entrada aproximada de 120 V AC, una salida de 5 V DC, encendido estable, aislamiento interno y externo, y protección mediante un fusible de 0,5 A.	Fotografías y Anexo 6.
Prueba de cámara	La cámara capturó una imagen de la huella plantar sobre el vidrio, con apoyo de la iluminación interna, y la incorporó correctamente en el informe de la sesión.	Fotografía incluida en el informe HTML.
Pruebas de sensores FSR	Los 80 sensores respondieron ante la aplicación de carga y conservaron la correspondencia entre su ubicación física, su identificación alfanumérica y la posición representada en las matrices del informe HTML.	Informe HTML generado y Anexo 6.
Pruebas de comunicación y firmware	El sistema ejecutó correctamente la secuencia de captura, habilitación de la medición, lectura de los sensores, transmisión de datos, almacenamiento e indicación de estados mediante los LEDs.	Anexo 6.
Prueba integrada	El prototipo completó una sesión funcional, generó el informe HTML, almacenó la información en la memoria microSD y permitió descargar el archivo mediante la red Wi-Fi local.	Anexo 6 e informe HTML final.

Los resultados resumidos muestran que los subsistemas mecánico, eléctrico, electrónico y de software operaron de forma coordinada durante la ejecución de la secuencia completa de medición.

6.3. Informe HTML generado

El principal resultado de salida del sistema corresponde al informe HTML generado automáticamente al finalizar cada sesión. Este archivo integra la información general del registro, la fotografía capturada sobre el vidrio, las matrices izquierda y derecha, las lecturas relativas de cada sensor y

el resumen técnico de la medición. La versión completa del informe puede consultarse en el [Anexo 9 – Informe HTML final](#), donde se encuentra disponible el enlace para abrirlo y visualizarlo desde un navegador web.

El archivo puede abrirse en un navegador web sin requerir software especializado. La versión completa del informe presentado en esta sección puede consultarse mediante el enlace dispuesto en el anexo del informe HTML final.

6.3.1. Información general y fotografía del registro

La sección inicial del informe presenta la identificación del usuario, la fecha y hora de generación, el nombre del archivo, la duración programada de la medición y la configuración de las matrices. También incluye una aclaración sobre el alcance de los resultados, indicando que los valores corresponden a una distribución relativa del apoyo y no a una medición calibrada de presión plantar.



Figura 6.2: Información general de la sesión y fotografía capturada sobre el vidrio incluida en el informe HTML.

La fotografía permite conservar una referencia visual de la posición de los pies y de la huella observada sobre el vidrio durante la primera etapa de la sesión. Posteriormente, esta información puede revisarse junto con las lecturas obtenidas en la cama de sensores.

6.3.2. Visualización de las matrices por colores

El informe presenta las lecturas correspondientes a dos matrices independientes de 10×4 : una para el pie izquierdo y otra para el pie derecho. La vista por colores clasifica la respuesta relativa de los sensores mediante una escala cromática de cinco niveles.



Figura 6.3: Visualización por rangos de color de las matrices izquierda y derecha en el informe HTML.

Cada lectura se normaliza con respecto al sensor que presentó la mayor respuesta durante la medición, al cual se le asigna el 100 %. En consecuencia, los colores representan distintos niveles de activación relativa dentro de la misma sesión y permiten reconocer visualmente las zonas donde se presentó una mayor respuesta de los sensores.

Esta representación no expresa fuerza absoluta, porcentaje del peso corporal ni presión plantar calibrada. Su finalidad es facilitar la comparación relativa entre los distintos puntos de sensado durante una misma medición.

6.3.3. Visualización porcentual e identificación de los sensores

El usuario puede alternar la visualización por colores con una vista porcentual. En esta segunda presentación, cada punto activo muestra el porcentaje de respuesta relativa calculado para el sensor correspondiente.



Figura 6.4: Visualización porcentual e identificación alfanumérica de los sensores en las matrices del informe HTML.

Cada sensor posee una identificación alfanumérica ubicada en la parte inferior de su respectiva celda. Las letras comprendidas entre la A y la J indican la fila longitudinal de la matriz, mientras que los números del 1 al 4 indican la columna. De esta manera, cada matriz contiene las posiciones A1, A2, A3 y A4 hasta J1, J2, J3 y J4.

La identificación se complementa con el lado de la matriz en la que se encuentra el sensor. Por tanto, un sensor puede identificarse de forma completa como, por ejemplo, “D3 de la matriz derecha” o “B2 de la matriz izquierda”. Esta nomenclatura permite relacionar directamente:

- la posición física del sensor en la cama de sensado;
- su ubicación dentro de la matriz izquierda o derecha;
- el porcentaje relativo mostrado en el informe;

- el punto representado en la visualización por colores; y
- las métricas presentadas en el resumen técnico del registro.

La codificación mediante letra, número y lado de la matriz facilita la trazabilidad de cada lectura. Por ejemplo, cuando el resumen técnico identifica un sensor como el de mayor respuesta, el usuario puede localizarlo directamente en la matriz mediante el código presentado en el informe.

6.3.4. Resumen técnico del registro

En la parte inferior del informe se presenta un resumen técnico con los principales parámetros obtenidos durante la sesión.

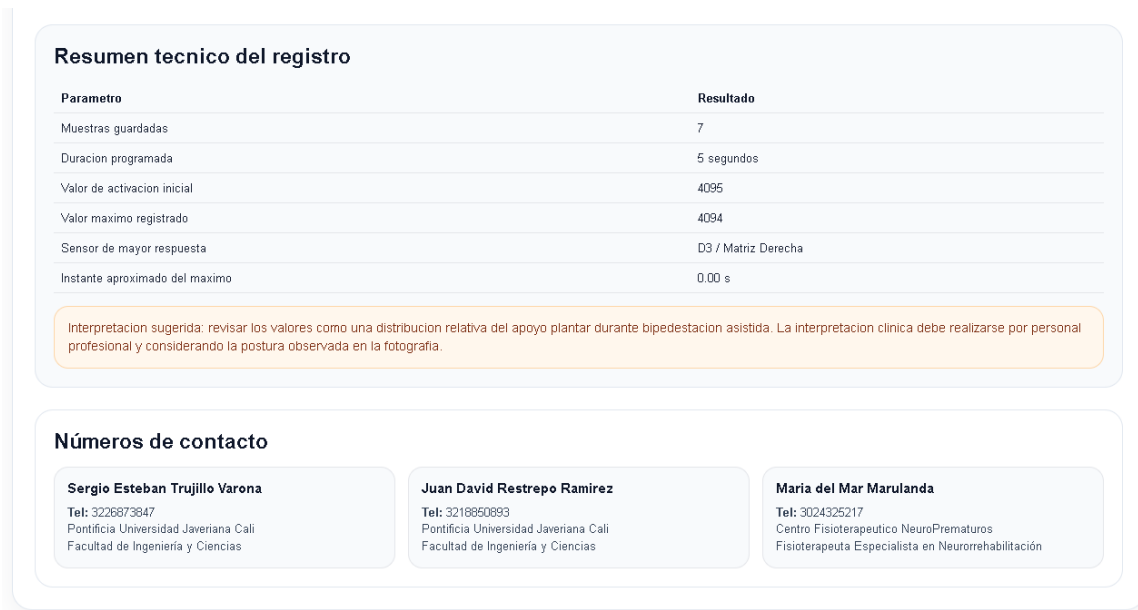


Figura 6.5: Resumen técnico del registro e información complementaria incluida en el informe HTML.

El resumen técnico incluye los siguientes datos:

- cantidad de muestras guardadas;
- duración programada de la medición;
- valor establecido para iniciar el registro;
- valor máximo registrado;
- sensor que presentó la mayor respuesta; y

- instante aproximado en el cual se produjo el valor máximo.

La métrica correspondiente al sensor de mayor respuesta utiliza la misma identificación alfanumérica presentada debajo de cada punto de las matrices. Por ejemplo, una indicación como “D3 Matriz Derecha” significa que el mayor valor de la sesión se registró en la fila D, columna 3, de la matriz correspondiente al pie derecho.

De esta forma, el usuario puede localizar el sensor señalado en el resumen técnico, revisar su porcentaje relativo y comparar su respuesta con la de los demás puntos de sensado.

6.4. Resultado de los sensores

Durante las pruebas se verificó la respuesta funcional de los 80 sensores que conforman la cama de sensado. Para ello, se aplicó carga sobre diferentes posiciones de las matrices y se comprobó que la respuesta registrada apareciera en el punto correspondiente del informe HTML.

Todos los sensores presentaron respuesta ante la aplicación de carga y mantuvieron correspondencia entre su posición física y la visualización generada. La activación de cada punto pudo identificarse tanto en la vista por colores como en la vista porcentual.

La correspondencia se verificó considerando las dos matrices de 10×4 , la identificación alfanumérica de cada sensor y el lado del apoyo. De esta manera, la selección de un punto específico en la matriz física produjo una respuesta en la celda equivalente del informe.

Los resultados confirmaron que el mapeo implementado conserva la relación entre:

$$\text{posición física} \longleftrightarrow \text{canal electrónico} \longleftrightarrow \text{identificación alfanumérica} \longleftrightarrow \text{visualización HTML} \quad (6.1)$$

Esta correspondencia permite que las métricas presentadas en el resumen técnico puedan relacionarse con un sensor específico y localizarse dentro de las matrices del informe.

6.5. Resultado de usabilidad

La revisión realizada con la fisioterapeuta María del Mar Marulanda permitió identificar que el prototipo resulta práctico como herramienta de apoyo para el registro del apoyo plantar durante bipedestación asistida.

Se destacó que el informe HTML facilita la consulta posterior de la sesión, al integrar en un mismo archivo la fotografía de la huella plantar, la visualización de las matrices, los porcentajes relativos y el resumen técnico del registro.

La identificación mediante letras y números permite localizar los puntos de sensado sin requerir conocimiento del canal electrónico interno. Asimismo, la posibilidad de alternar entre la vista por colores y la vista porcentual facilita una revisión general del apoyo y, posteriormente, una consulta más detallada de cada sensor.

También se consideró útil que el informe pueda abrirse desde un navegador web, almacenarse como un archivo independiente y compartirse con otros profesionales cuando sea necesario. La

descarga mediante Wi-Fi local permite obtener el informe desde un computador o dispositivo móvil sin retirar la memoria microSD y sin requerir conexión a Internet.

6.6. Discusión

Los resultados muestran que el prototipo cumple su función como herramienta de registro y apoyo visual para la revisión del apoyo plantar infantil. El sistema permite conservar evidencia organizada de cada sesión y presentar la información de manera comprensible para el personal tratante.

El informe HTML constituye el resultado más relevante del sistema, debido a que reúne en un solo archivo la fotografía capturada, las lecturas relativas de los sensores, la identificación de cada punto, la visualización cromática, los porcentajes y el resumen técnico de la sesión. Esta integración evita depender de archivos separados y facilita la revisión posterior del registro.

La identificación mediante una letra, un número y el lado de la matriz permite relacionar las métricas del resumen técnico con una posición específica. Esta característica mejora la trazabilidad de la información, ya que el sensor de mayor respuesta y los demás puntos activados pueden localizarse directamente dentro del mapa presentado al usuario.

La respuesta observada en los 80 sensores y la correspondencia entre la matriz física y el informe generado respaldan el funcionamiento de la etapa de adquisición. Asimismo, la generación automática del reporte reduce la necesidad de organizar manualmente las mediciones después de cada sesión.

La descarga mediante Wi-Fi local aporta practicidad al sistema, porque permite obtener el último informe desde un computador o dispositivo móvil sin retirar la memoria microSD y sin depender de una red externa. La evidencia completa del archivo generado puede consultarse en el anexo del informe HTML final.

Desde la perspectiva económica, el valor estimado del prototipo fue de \$3.419.289 COP, equivalente aproximadamente a US\$1.036,15 con la tasa de conversión adoptada. Este valor fue aproximadamente un 51,0 % inferior al sistema comercial de menor precio incluido en la comparación y un 94,9 % inferior al de mayor precio. La diferencia resulta pertinente para el contexto del centro terapéutico, donde las restricciones presupuestales habían limitado previamente la adquisición de plataformas especializadas.

Sin embargo, el menor costo no debe interpretarse como una equivalencia de prestaciones. Las plataformas comerciales pueden incorporar calibración metrológica, certificaciones, mayor resolución espacial, análisis clínicos especializados, soporte técnico y garantías. Por su parte, el prototipo desarrollado se delimitó al registro relativo del apoyo plantar, la captura de una referencia fotográfica, el almacenamiento local y la generación de un informe de revisión. En consecuencia, su ventaja económica debe analizarse dentro de este alcance funcional y no como una sustitución directa de equipos clínicos certificados.

6.7. Limitaciones de los resultados

Los resultados deben interpretarse considerando el alcance funcional del prototipo. Las lecturas obtenidas mediante los sensores FSR son relativas y no corresponden a valores calibrados de presión plantar. Por esta razón, los porcentajes presentados en el informe permiten comparar la respuesta entre sensores dentro de una misma sesión, pero no deben interpretarse como valores absolutos de fuerza, presión o distribución del peso corporal.

La escala porcentual se establece tomando como referencia el sensor de mayor respuesta de cada medición, definido como el 100 %. En consecuencia, los porcentajes pueden variar entre sesiones y no constituyen directamente una unidad física comparable con equipos clínicos calibrados.

Además, la fotografía de la huella plantar sobre el vidrio y la medición realizada sobre la cama de sensores corresponden a momentos consecutivos del procedimiento. Por tanto, la fotografía funciona como una referencia visual complementaria, pero no representa una captura simultánea de la misma superficie sobre la cual se obtienen las lecturas FSR.

La identificación alfanumérica permite localizar cada sensor dentro de las matrices, pero no asigna automáticamente una región anatómica específica del pie. La relación con zonas anatómicas debe interpretarse considerando la posición del usuario, el tamaño del pie y su ubicación sobre la cama de sensado.

Finalmente, la evaluación realizada corresponde a una verificación técnica, funcional y de usabilidad del prototipo, y no a una validación clínica con una muestra amplia de usuarios. Por esta razón, los resultados respaldan el funcionamiento del sistema como herramienta de apoyo para el registro y la visualización del apoyo plantar, pero no permiten establecer diagnósticos ni conclusiones clínicas generalizables.

Conclusiones

A partir del desarrollo, la implementación y la verificación realizada, se concluye que el objetivo general del proyecto fue alcanzado dentro del alcance funcional definido. Se obtuvo una plataforma baropodométrica infantil capaz de registrar, visualizar y conservar información relativa del apoyo plantar durante la bipedestación asistida. El sistema complementa la valoración observacional del personal tratante mediante registros visuales y numéricos organizados por sesión, sin sustituir el criterio profesional ni atribuir a las lecturas un carácter diagnóstico.

Respecto al primer objetivo específico, la definición de los requisitos clínicos, de uso y técnicos permitió transformar las necesidades identificadas en el centro terapéutico Neuroprematuros en criterios concretos de diseño. La operación supervisada, la escala infantil, la diferenciación del apoyo izquierdo y derecho, la estabilidad estructural, la protección de los componentes, la facilidad de limpieza y la conservación de los registros orientaron las decisiones adoptadas durante el desarrollo. Por tanto, se concluye que el levantamiento de requisitos proporcionó una base coherente para adaptar la solución al contexto real de uso, en lugar de limitar el proyecto a la construcción de un sistema electrónico aislado.

En relación con el segundo objetivo específico, la arquitectura desarrollada permitió integrar los componentes mecánicos, electrónicos, de firmware, almacenamiento y visualización requeridos para obtener un registro organizado del apoyo plantar. La organización de los 80 sensores FSR en dos matrices independientes de 10×4 , junto con la PCB de adquisición, la multiplexación y los dos microcontroladores, permitió conservar la trazabilidad entre la posición física de cada sensor, su canal electrónico, su identificación alfanumérica y su representación en el informe HTML. Se concluye, por tanto, que la arquitectura propuesta fue adecuada para registrar y representar separadamente el apoyo relativo correspondiente a ambos pies.

Frente al tercer objetivo específico, la implementación dio como resultado un prototipo funcional apto para sesiones supervisadas. El sistema ejecuta una secuencia en la que la captura fotográfica inicial habilita posteriormente la medición sobre la cama de sensores, evitando la generación de registros sin una imagen de referencia asociada. Al finalizar la sesión, la información se almacena en la memoria microSD y se consolida en un informe HTML que puede consultarse desde un navegador. La posibilidad de descargar el último informe mediante la red Wi-Fi local demuestra que la solución puede conservar y facilitar el acceso a los registros sin depender de conexión a Internet ni de software especializado.

En cuanto al cuarto objetivo específico, las pruebas realizadas permitieron verificar el funcionamiento técnico del prototipo bajo las condiciones evaluadas. La estructura soportó una carga estática aproximada de (50 kg) sin presentar deformaciones permanentes o pérdida de estabilidad; la etapa de alimentación suministró los niveles requeridos por los módulos; y el sistema completó

la captura, adquisición, comunicación, almacenamiento y generación del informe sin interrupciones durante la prueba integrada. Asimismo, los 80 sensores respondieron ante la aplicación de carga y mantuvieron correspondencia entre la zona activada físicamente y la posición presentada en las matrices del informe. Estos resultados permiten concluir que el prototipo satisface los criterios funcionales de estabilidad, respuesta, coherencia espacial y operación integrada establecidos para esta etapa del proyecto.

Respecto al quinto objetivo específico, la revisión efectuada con personal tratante y la comprobación puntual dentro del flujo terapéutico permitieron establecer que el procedimiento de operación y el informe generado son comprensibles para el uso previsto. La integración de la fotografía, las matrices, los porcentajes relativos, la identificación alfanumérica de los sensores y el resumen técnico facilita la localización y revisión posterior de los puntos registrados. También se consideró útil que el informe pueda almacenarse, consultarse desde un navegador y compartirse con otros profesionales. En consecuencia, se concluye que el prototipo presenta condiciones favorables para integrarse como herramienta complementaria de documentación, aunque esta valoración corresponde a una revisión inicial de usabilidad y no a una validación clínica generalizable.

Más allá de los resultados técnicos, el proyecto presenta una dimensión social relevante al haberse desarrollado a partir de una necesidad identificada en un contexto de atención a población infantil con discapacidad y alteraciones neuromotoras, entre ellas la parálisis cerebral. En este sentido, el valor de la propuesta no reside únicamente en la construcción de un dispositivo electrónico, sino en la aplicación de conocimientos de ingeniería para apoyar el trabajo de profesionales que acompañan procesos terapéuticos de niños que requieren atención especializada. La posibilidad de disponer de registros organizados, trazables y fácilmente consultables puede contribuir a fortalecer la documentación y el seguimiento de las sesiones, favoreciendo además la comunicación de la información entre los profesionales involucrados en la atención del niño.

Desde esta perspectiva, el proyecto evidencia también la importancia de orientar el desarrollo tecnológico hacia necesidades humanas concretas. Trabajar con una población infantil con discapacidad exige considerar no solamente variables de funcionamiento electrónico, sino aspectos como seguridad, dimensiones, facilidad de uso, interacción con el terapeuta y adaptación al entorno terapéutico. La incorporación de estas condiciones desde las etapas iniciales permitió desarrollar una solución centrada en el contexto de sus usuarios y demuestra cómo la ingeniería puede aportar herramientas tecnológicas accesibles y contextualizadas para instituciones que trabajan con poblaciones que requieren apoyos especializados.

Como respuesta a la pregunta central del proyecto, fue posible diseñar e implementar una alternativa funcional y adaptada al contexto del centro terapéutico para complementar la valoración observacional del apoyo plantar infantil. Su principal aporte consiste en convertir una sesión supervisada en un registro digital trazable, compuesto por una referencia fotográfica, lecturas relativas organizadas espacialmente y un informe integrado para consulta posterior. De esta manera, la solución reduce la dependencia exclusiva de registros manuales y facilita la conservación estructurada de la información obtenida durante cada sesión. Al mismo tiempo, su desarrollo representa una aplicación de la ingeniería orientada a una necesidad social concreta, al brindar una herramienta de apoyo al personal que trabaja con niños con discapacidad y condiciones neuromotoras.

Finalmente, el alcance de los resultados está condicionado por las características de los sensores FSR y por el nivel de desarrollo del prototipo. Los porcentajes mostrados representan respuestas relativas respecto al sensor de mayor activación de cada medición y no corresponden a valores absolutos de fuerza, presión plantar o porcentaje del peso corporal. Además, la captura fotográfica y la lectura sobre sensores se realizan en momentos consecutivos y sobre superficies diferentes. En consecuencia, el sistema debe entenderse como una herramienta funcional de registro y visualización complementaria, y no como un dispositivo médico certificado, una plataforma clínicamente validada o un instrumento diagnóstico.

Estas limitaciones no eliminan el aporte tecnológico y social alcanzado, sino que delimitan correctamente su nivel actual de desarrollo. El prototipo constituye una base funcional sobre la cual podrían realizarse futuras mejoras técnicas y procesos de validación más amplios. De esta manera, el proyecto no solo demuestra la viabilidad de integrar sensores, electrónica, almacenamiento y visualización para el registro del apoyo plantar infantil, sino también el potencial de desarrollar soluciones de ingeniería con propósito social, orientadas a apoyar a profesionales, instituciones, familias y, especialmente, a niños que enfrentan condiciones de discapacidad y requieren procesos de atención y rehabilitación especializados.

Recomendaciones

A partir del desarrollo, las pruebas y los resultados obtenidos, se proponen recomendaciones orientadas a conservar el funcionamiento del prototipo, fortalecer su operación y facilitar posibles mejoras en futuras etapas. Estas recomendaciones no modifican los resultados alcanzados, sino que señalan acciones de mantenimiento, estandarización y ampliación que pueden contribuir a preservar la confiabilidad, seguridad y utilidad del sistema.

8.1. Mantenimiento de la cama de sensores

Las pruebas realizadas permitieron comprobar la respuesta de los 80 sensores FSR y la correspondencia entre su posición física, el canal electrónico y la representación presentada en el informe HTML. Para conservar este funcionamiento, se recomienda realizar verificaciones periódicas de la cama de sensores, especialmente después de intervenciones sobre las soldaduras, el cableado, los conectores o la PCB de adquisición.

La verificación puede efectuarse aplicando carga individual sobre cada punto de sensado y comprobando que la respuesta aparezca en la posición alfanumérica correspondiente de la matriz izquierda o derecha. Este procedimiento permite confirmar que se mantiene la relación entre:

$$\text{sensor físico} \longleftrightarrow \text{canal electrónico} \longleftrightarrow \text{posición en el informe} \quad (8.1)$$

También se recomienda revisar periódicamente la fijación de los sensores sobre el cajón instrumentado, el aislamiento de sus terminales y el estado de los conductores. En caso de identificar una lectura inestable o una pérdida de respuesta, debe revisarse primero la continuidad del cableado, la conexión al conector correspondiente y la integridad de la soldadura antes de sustituir el sensor.

8.2. Estandarización de las condiciones de medición

Debido a que el sistema presenta las lecturas como porcentajes de apoyo relativo, se recomienda mantener condiciones de operación semejantes entre sesiones para facilitar la comparación general de los registros. Entre estas condiciones se encuentran la ubicación de los pies sobre las matrices, el tiempo programado de adquisición, la postura asistida del usuario y el acompañamiento del personal tratante.

Antes de iniciar cada sesión, debe verificarse que la cama de sensores se encuentre sin carga durante la etapa de referencia inicial. Asimismo, se recomienda evitar que el usuario, el terapeuta u otros elementos ejerzan presión sobre la superficie instrumentada antes de habilitar la medición, debido a que esta condición podría alterar la línea base utilizada por el firmware.

También se recomienda utilizar una guía visual o procedimiento de ubicación que facilite mantener una posición semejante de los pies cuando se realicen registros sucesivos del mismo usuario. Esta medida no convierte las lecturas en valores absolutos de presión, pero contribuye a mejorar la consistencia operativa y la comparación visual de los patrones relativos obtenidos.

La interpretación debe continuar centrada en la distribución espacial y en las diferencias relativas entre los puntos de sensado dentro de cada sesión. Los porcentajes mostrados en el informe no deben interpretarse como porcentajes del peso corporal, fuerza absoluta ni presión plantar.

8.3. Mejoras mecánicas y de mantenimiento

Se recomienda realizar revisiones periódicas de la estructura, el vidrio superior, el cajón inferior y las superficies de apoyo. Estas inspecciones deben verificar que no existan fisuras, deformaciones, bordes expuestos, holguras, desprendimientos o interferencias mecánicas que puedan afectar la estabilidad del prototipo durante su operación.

El vidrio superior debe revisarse antes de cada sesión para confirmar que se encuentre correctamente apoyado sobre el marco y que no presente fisuras, fracturas o desplazamientos. El prototipo no debe utilizarse cuando se identifiquen daños en esta superficie.

También se recomienda revisar periódicamente el desplazamiento del cajón instrumentado. La apertura y el cierre deben realizarse sin aplicar fuerza excesiva y sin generar tensión sobre los conductores conectados a la cama de sensores. Debido al movimiento repetido del cajón, conviene verificar que el cableado interno permanezca organizado, protegido y sin puntos de compresión o rozamiento.

Las uniones de la estructura y los elementos de fijación deben inspeccionarse para comprobar que se mantengan firmes. No se recomienda superar la carga estática aproximada de 50 kg verificada durante las pruebas del prototipo.

8.4. Seguridad eléctrica y alimentación

Se recomienda realizar inspecciones periódicas de la etapa de alimentación, especialmente del cable exterior, el conector de entrada, el interruptor general, el portafusible, el fusible de 0,5 A, los empalmes internos y las salidas de 5 V DC destinadas a los módulos electrónicos. Estas revisiones deben efectuarse con el sistema apagado y desconectado de la red eléctrica.

Cuando sea necesario sustituir el fusible, debe utilizarse otro elemento con las mismas características eléctricas y una corriente nominal de 0,5 A. No debe reemplazarse por un conductor, un puente eléctrico o un fusible de mayor corriente sin realizar previamente una revisión técnica del sistema.

No se recomienda operar el prototipo si se observan cables expuestos, falsos contactos, calentamiento anormal, olor a material recalentado, chisporroteo, daños en el conector de entrada, interrupciones durante el encendido o variaciones anormales en la iluminación. Ante cualquiera de estas condiciones, el sistema debe desconectarse y ser revisado antes de volver a utilizarse.

También se recomienda mantener separadas las conexiones correspondientes a la entrada de 120 V AC de las líneas de baja tensión utilizadas por los microcontroladores. Cualquier intervención en la caja eléctrica debe ser realizada por una persona con conocimientos técnicos y con el prototipo completamente desconectado.

8.5. Limpieza e higiene operativa

Se recomienda mantener un procedimiento de limpieza antes y después de cada sesión, especialmente sobre el vidrio superior, el cajón instrumentado y las zonas de contacto con los pies del usuario. La limpieza debe realizarse con el sistema apagado y desconectado de la red eléctrica.

Los productos de limpieza deben aplicarse primero sobre un paño y no directamente sobre el prototipo. Debe evitarse el ingreso de líquidos a través de ranuras, conectores, uniones, orificios o zonas donde se encuentren componentes electrónicos.

Después de la limpieza, las superficies deben permanecer secas antes de encender nuevamente el sistema. También se recomienda revisar que no queden residuos sobre los sensores que puedan modificar el contacto del pie con la cama de sensado.

El procedimiento detallado de limpieza, cuidado y cierre operativo debe consultarse en el Manual de Usuario presentado en el Anexo 4. Esta recomendación es especialmente importante debido a que el prototipo está orientado a población infantil y debe conservar condiciones adecuadas de higiene durante su uso supervisado.

8.6. Mejoras de firmware y visualización

Como mejora futura, se recomienda incorporar mensajes de advertencia más específicos ante condiciones como fallas de inicialización de la cámara, ausencia o error de la tarjeta microSD, pérdida de comunicación entre los microcontroladores, imposibilidad de crear el informe o intento de iniciar la medición sin una captura fotográfica previa.

También podría incorporarse una confirmación visual que indique al personal tratante que la fotografía fue almacenada, que la medición finalizó correctamente y que el informe se encuentra disponible para descarga. Esta información facilitaría la identificación del estado del sistema sin necesidad de interpretar únicamente los indicadores LED.

Se recomienda conservar la posibilidad de alternar entre la visualización por colores y la visualización porcentual, debido a que ambas presentaciones ofrecen niveles complementarios de lectura. La vista por colores facilita una revisión rápida de la distribución relativa, mientras que los porcentajes permiten identificar con mayor detalle la respuesta de cada sensor.

Como ampliación del informe HTML, podría incorporarse un campo para observaciones del personal tratante, un código interno del usuario o notas asociadas a la sesión. La implementación de estos campos debe considerar criterios de privacidad, acceso controlado y manejo responsable de la información.

También se recomienda mantener copias de respaldo periódicas de los informes almacenados en la tarjeta microSD, especialmente cuando el sistema sea utilizado en múltiples sesiones.

8.7. Ampliación de las pruebas de funcionamiento

Para futuras etapas se recomienda ampliar la cantidad de sesiones supervisadas en las que se evalúe el funcionamiento del prototipo. Estas pruebas pueden utilizarse para revisar la estabilidad del flujo de operación, la facilidad de ubicación de los usuarios, la consistencia de los informes generados y el comportamiento del sistema durante periodos prolongados de uso.

También sería conveniente registrar incidencias operativas, tiempos aproximados de preparación, dificultades durante la ubicación del usuario y observaciones relacionadas con la consulta o descarga del informe. Esta información permitiría priorizar mejoras de diseño a partir de las condiciones reales de uso.

La ampliación de las pruebas debe conservar el alcance relativo de las lecturas y no debe presentarse como una validación diagnóstica. Cualquier evaluación clínica posterior requeriría una metodología específica, aprobación institucional, criterios definidos por profesionales de la salud y un procedimiento formal de manejo de datos.

8.8. Uso terapéutico y alcance del sistema

Se recomienda mantener el uso del prototipo como herramienta complementaria a la valoración realizada por el personal tratante. El informe generado puede utilizarse para conservar evidencia de la sesión, revisar la distribución relativa del apoyo y apoyar la comunicación de observaciones entre profesionales.

El sistema no debe emplearse de manera autónoma por el usuario ni utilizarse para emitir diagnósticos, prescribir tratamientos o sustituir la valoración clínica. La interpretación de la fotografía, los porcentajes relativos y las matrices debe realizarse considerando la postura, las condiciones de apoyo y las características particulares de cada usuario.

La fotografía y la medición sobre sensores deben entenderse como registros complementarios obtenidos en etapas consecutivas. Por esta razón, se recomienda evitar interpretaciones que asuman una correspondencia simultánea y exacta entre la huella observada sobre el vidrio y la distribución registrada posteriormente en la cama de sensores.

8.9. Capacitación del personal tratante

Se recomienda capacitar al personal encargado de operar el sistema en el flujo completo de uso, incluyendo encendido, verificación inicial, captura fotográfica, ubicación del usuario, extracción del cajón, medición sobre sensores, descarga del informe, limpieza y apagado del prototipo.

La capacitación debe enfatizar que la medición solo se habilita después de realizar la captura fotográfica y que el usuario debe permanecer acompañado durante todo el procedimiento. También debe explicarse la identificación alfanumérica de los sensores, la diferencia entre la vista por colores y la vista porcentual, y el carácter relativo de las lecturas presentadas.

Asimismo, se recomienda que el personal tratante consulte el Manual de Usuario presentado en el Anexo 4 antes de utilizar el prototipo. Cualquier falla, comportamiento inesperado o necesidad

de ajuste detectada durante las sesiones debe registrarse para facilitar su revisión técnica y orientar futuras mejoras del sistema.

CAPÍTULO 9

Anexos

1. Esquemáticos complementarios ampliados de la matriz de sensores

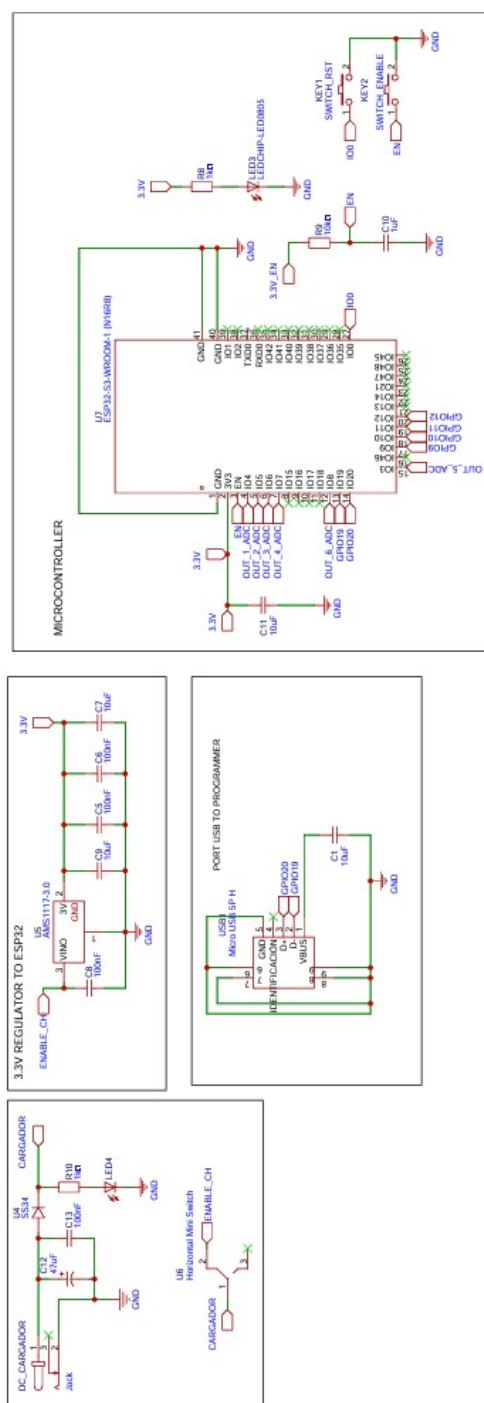


Figura 9.1: Versión ampliada del diseño 1 del esquemático complementario de la matriz de sensores FSR.

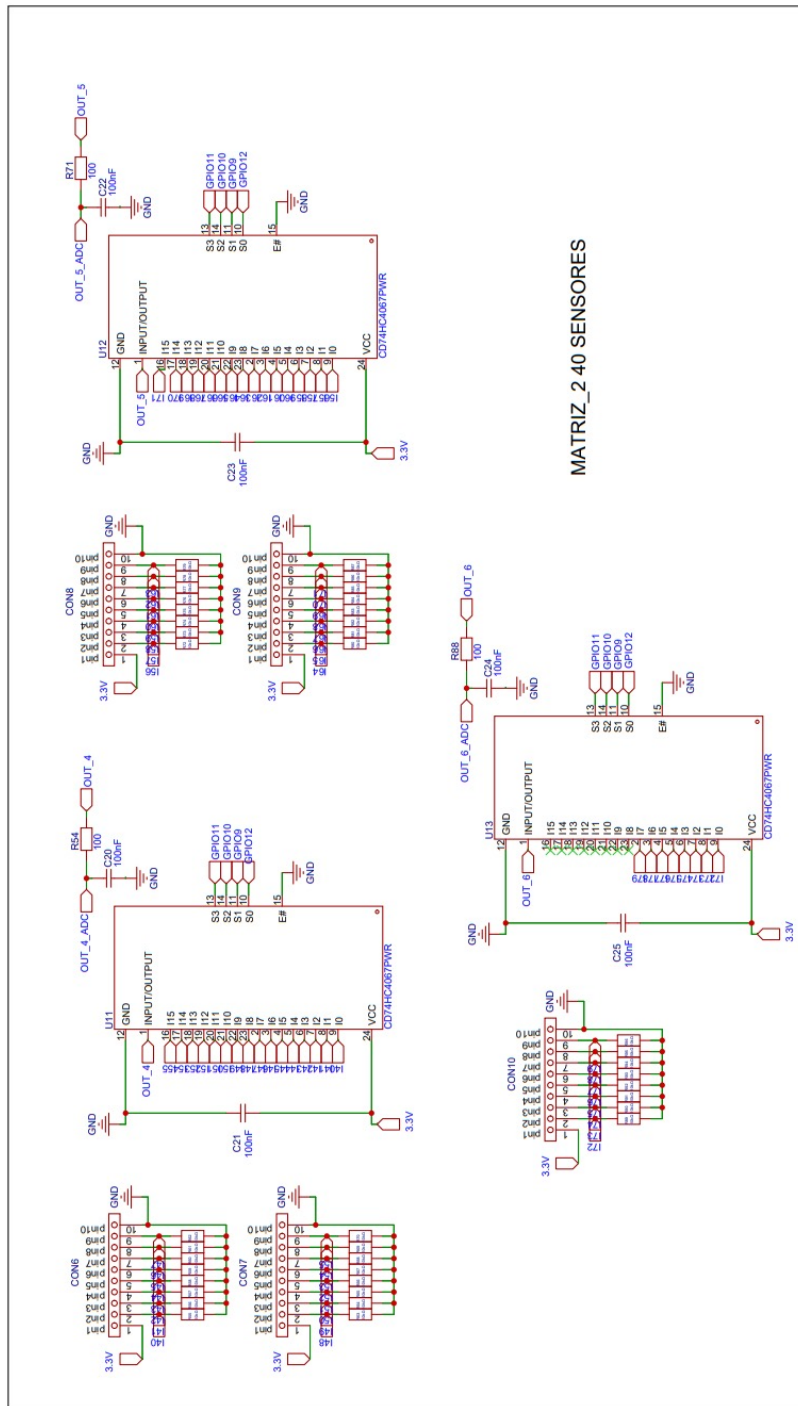


Figura 9.3: Versión ampliada del diseño 3 del esquemático complementario de la matriz de sensores FSR.

2. Código principal del ESP32-S3 lector

Este anexo presenta el código principal implementado en el microcontrolador ESP32-S3 encargado de la lectura de los sensores FSR. El firmware controla la selección de canales en los multiplexores, realiza la adquisición secuencial de los 80 puntos de sensado, organiza las lecturas en dos matrices independientes y envía la información al ESP32 receptor para su almacenamiento y visualización.

```

1
2 #include <WiFi.h>
3 #include <WiFiUdp.h>
4
5 // =====
6 // WIFI HACIA SUNFOUNDER RECEPTORA
7 // =====
8 const char* WIFI_SSID = "FSR_LOGGER";
9 const char* WIFI_PASS = "12345678";
10
11 IPAddress receptorIP(192, 168, 4, 1);
12
13 const int UDP_DATA_PORT = 4210;
14 const int UDP_CMD_PORT = 4211;
15
16 WiFiUDP udp;
17
18 // =====
19 // CONFIGURACION GENERAL
20 // =====
21 const int NUM_SENSORES = 80;
22 const int NUM_MUX = 6;
23
24 const int MUX_S0 = 12;
25 const int MUX_S1 = 9;
26 const int MUX_S2 = 10;
27 const int MUX_S3 = 11;
28
29 const int ADC_MUX[NUM_MUX] = {
30     4, // U8 -> CON1/CON2
31     5, // U9 -> CON3/CON4
32     6, // U10 -> CON5
33     7, // U11 -> CON6/CON7
34     3, // U12 -> CON8/CON9
35     8 // U13 -> CON10
36 };
37
38 const int OFFSET_MUX[NUM_MUX] = {
39     0, 16, 32, 40, 56, 72
40 };
41
42 const int CANALES_VALIDOS[NUM_MUX] = {
43     16, 16, 8, 16, 16, 8
44 };
45
46 // =====
47 // MATRICES 10x4 - ORGANIZACION ACTUALIZADA
48 // =====
49 const int FILAS = 10;
50 const int COLUMNAS = 4;

```

```

51
52 const int matrizIzquierda[FILAS][COLUMNAS] = {
53     {76, 77, 78, 79},
54     {72, 73, 74, 75},
55     {68, 69, 70, 71},
56     {64, 65, 66, 67},
57     {60, 61, 62, 63},
58     {56, 57, 58, 59},
59     {52, 53, 54, 55},
60     {48, 49, 50, 51},
61     {44, 45, 46, 47},
62     {40, 41, 43, 42}
63 };
64
65 const int matrizDerecha[FILAS][COLUMNAS] = {
66     {36, 37, 38, 39},
67     {32, 33, 34, 35},
68     {28, 29, 30, 31},
69     {24, 25, 26, 27},
70     {20, 21, 22, 23},
71     {16, 17, 18, 19},
72     {12, 13, 14, 15},
73     {8, 9, 10, 11},
74     {4, 5, 6, 7},
75     {0, 1, 2, 3}
76 };
77
78 // =====
79 // AJUSTES DE LECTURA
80 // =====
81 const int ESTABILIZACION_US = 2500;
82 const int DESCARTES = 20;
83 const int MUESTRAS = 25;
84 const int PAUSA_US = 120;
85
86 // =====
87 // FILTRO
88 // =====
89 const int ZONA_MUERTA = 25;
90 const int UMBRAL_ABSOLUTO = 80;
91 const int UMBRAL_CAMBIO_INICIO = 4000; // Inicio real: no enviar hasta que algun sensor supere este cambio
    contra su baseline.
92 const float PORCENTAJE_DEL_MAXIMO = 0.12;
93 const float RELACION_FANTASMA = 0.18;
94
95 // =====
96 // ENVIO
97 // =====
98 const unsigned long DURACION_ENVIO_MS = 5000;
99 const unsigned long INTERVALO_ENVIO_MS = 100;
100 const unsigned long INTERVALO_SERIAL_MS = 500;
101 const unsigned long INTERVALO_ESTADO_MS = 1000;
102
103 bool medicionAutorizadaPorBoton = false;
104 bool enviando = false;
105 bool calibracionOK = false;
106
107 unsigned long inicioEnvio = 0;

```

```
108 unsigned long ultimoEnvioDatos = 0;
109 unsigned long ultimoSerial = 0;
110 unsigned long ultimoEnvioEstado = 0;
111
112 int raw[NUM_SENSORES];
113 int baseline[NUM_SENSORES];
114 int cambio[NUM_SENSORES];
115 int valores[NUM_SENSORES];
116
117 // Porcentaje relativo por lectura. El sensor con mayor respuesta activa
118 // se representa como 100 % y los demas de forma proporcional.
119 float porcentajeRelativo[NUM_SENSORES];
120 int maximoVisualizacion = 0;
121
122 // =====
123 // WIFI
124 // =====
125 bool wifiReportado = false;
126 unsigned long ultimoIntentoWiFi = 0;
127 const unsigned long INTERVALO_REINTENTO_WIFI_MS = 5000;
128
129 bool gestionarWiFi() {
130     if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
131         if (!wifiReportado) {
132             Serial.println();
133             Serial.println("WiFi conectado correctamente.");
134             Serial.print("IP local: ");
135             Serial.println(WiFi.localIP());
136
137             udp.begin(UDP_CMD_PORT);
138             wifiReportado = true;
139         }
140
141         return true;
142     }
143
144     wifiReportado = false;
145     medicionAutorizadaPorBoton = false;
146     enviando = false;
147
148     if (millis() - ultimoIntentoWiFi >= INTERVALO_REINTENTO_WIFI_MS) {
149         ultimoIntentoWiFi = millis();
150
151         Serial.println();
152         Serial.print("Intentando conectar a ");
153         Serial.println(WIFI_SSID);
154
155         WiFi.mode(WIFI_STA);
156         WiFi.setSleep(false);
157         WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
158     }
159
160     return false;
161 }
162
163 // =====
164 // COMANDOS DESDE RECEPTORA
165 // =====
```

```
166 void revisarComandosReceptor() {
167     int packetSize = udp.parsePacket();
168
169     if (packetSize <= 0) return;
170
171     char buffer[80];
172     int len = udp.read(buffer, sizeof(buffer) - 1);
173
174     if (len <= 0) return;
175
176     buffer[len] = '\0';
177
178     String comando = String(buffer);
179     comando.trim();
180
181     if (comando == "ARMAR") {
182         medicionAutorizadaPorBoton = true;
183         enviando = false;
184
185         Serial.println();
186         Serial.println("Comando ARMAR recibido.");
187         Serial.println("Lista para enviar sensores multiples.");
188     }
189
190     if (comando == "DESARMAR") {
191         medicionAutorizadaPorBoton = false;
192         enviando = false;
193
194         Serial.println();
195         Serial.println("Comando DESARMAR recibido.");
196     }
197 }
198
199 // =====
200 // LECTURA MUX
201 // =====
202 void seleccionarCanal(uint8_t canal) {
203     digitalWrite(MUX_S0, bitRead(canal, 0));
204     digitalWrite(MUX_S1, bitRead(canal, 1));
205     digitalWrite(MUX_S2, bitRead(canal, 2));
206     digitalWrite(MUX_S3, bitRead(canal, 3));
207
208     delayMicroseconds(ESTABILIZACION_US);
209 }
210
211 int leerCanalMux(int adcPin, uint8_t canal) {
212     seleccionarCanal(canal);
213
214     for (int i = 0; i < DESCARTES; i++) {
215         analogRead(adcPin);
216         delayMicroseconds(PAUSA_US);
217     }
218
219     long suma = 0;
220
221     for (int i = 0; i < MUESTRAS; i++) {
222         suma += analogRead(adcPin);
223         delayMicroseconds(PAUSA_US);
```



```
224 }
225
226 return suma / MUESTRAS;
227 }
228
229 void leerTodosRaw() {
230     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
231         raw[i] = 0;
232     }
233
234     for (int mux = 0; mux < NUM_MUX; mux++) {
235         for (int canal = 0; canal < CANALES_VALIDOS[mux]; canal++) {
236             int idx = OFFSET_MUX[mux] + canal;
237             raw[idx] = leerCanalMux(ADC_MUX[mux], canal);
238         }
239     }
240 }
241
242 // =====
243 // CALIBRACION
244 // =====
245 void calibrarReposo() {
246     Serial.println();
247     Serial.println("=====");
248     Serial.println("CALIBRANDO REPOSO");
249     Serial.println("No presiones ningun sensor.");
250     Serial.println("=====");
251
252     delay(3000);
253
254     const int N = 25;
255     long acumulado[NUM_SENSORES];
256
257     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
258         acumulado[i] = 0;
259         baseline[i] = 0;
260     }
261
262     for (int n = 0; n < N; n++) {
263         leerTodosRaw();
264
265         for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
266             acumulado[i] += raw[i];
267         }
268
269         Serial.print(".");
270         delay(20);
271     }
272
273     Serial.println();
274
275     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
276         baseline[i] = acumulado[i] / N;
277     }
278
279     Serial.println("Calibracion lista.");
280     calibracionOK = true;
281 }
```

```

282
283 // =====
284 // FILTRO
285 // =====
286 void calcularValores() {
287     int maximo = 0;
288
289     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
290         int c = abs(raw[i] - baseline[i]);
291
292         if (c < ZONA_MUERTA) {
293             c = 0;
294         }
295
296         cambio[i] = c;
297
298         if (cambio[i] > maximo) {
299             maximo = cambio[i];
300         }
301     }
302
303     int umbralRelativo = max((int)(maximo * PORCENTAJE_DEL_MAXIMO), UMBRAL_ABSOLUTO);
304
305     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
306         if (cambio[i] >= umbralRelativo) {
307             valores[i] = cambio[i];
308         } else {
309             valores[i] = 0;
310         }
311     }
312
313     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
314         if (valores[i] == 0) continue;
315
316         int vecinoMayor = 0;
317
318         if (i > 0 && valores[i - 1] > vecinoMayor) {
319             vecinoMayor = valores[i - 1];
320         }
321
322         if (i < NUM_SENSORES - 1 && valores[i + 1] > vecinoMayor) {
323             vecinoMayor = valores[i + 1];
324         }
325
326         if (vecinoMayor > 0 && valores[i] < vecinoMayor * RELACION_FANTASMA) {
327             valores[i] = 0;
328         }
329     }
330 }
331
332 // =====
333 // NORMALIZACION RELATIVA 0 A 100 %
334 // =====
335 void calcularPorcentajesRelativos() {
336     maximoVisualizacion = 0;
337
338     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
339         if (valores[i] > maximoVisualizacion) {

```

```

340     maximoVisualizacion = valores[i];
341 }
342 }
343
344 for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
345     if (valores[i] > 0 && maximoVisualizacion > 0) {
346         porcentajeRelativo[i] =
347             ((float)valores[i] * 100.0f) / (float)maximoVisualizacion;
348     } else {
349         porcentajeRelativo[i] = 0.0f;
350     }
351 }
352 }
353
354 bool haySensorActivo() {
355     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
356         if (valores[i] > 0) return true;
357     }
358
359     return false;
360 }
361
362 bool haySensorCambioMayorAlInicio() {
363     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
364         // Se usa el cambio frente al baseline, no el raw absoluto.
365         // Así un sensor defectuoso que queda alto desde la calibración no dispara la medición.
366         if (cambio[i] > UMBRAL_CAMBIO_INICIO) {
367             return true;
368         }
369     }
370
371     return false;
372 }
373
374 int maxCambioActual() {
375     int m = 0;
376
377     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
378         if (cambio[i] > m) {
379             m = cambio[i];
380         }
381     }
382
383     return m;
384 }
385
386 // =====
387 // ENVIO UDP
388 // =====
389 void enviarDatos() {
390     int maxCambio = maxCambioActual();
391
392     // Protocolo nuevo:
393     // DATA,<maximo_cambio>,<80 valores ADC filtrados separados por coma>
394     // Se conservan los ADC para trazabilidad; la receptora calcula los porcentajes.
395     // La receptora ignora cualquier paquete que no tenga este encabezado.
396     String linea = "DATA,";
397     linea += String(maxCambio);

```

```
398     linea += ",";
399
400     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
401         linea += String(valores[i]);
402
403         if (i < NUM_SENSORES - 1) {
404             linea += ",";
405         }
406     }
407
408     udp.beginPacket(receptorIP, UDP_DATA_PORT);
409     udp.print(linea);
410     udp.endPacket();
411 }
412
413 void enviarEstadoSistema() {
414     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
415     if (!calibracionOK) return;
416
417     String estado = "ESTADO,LISTO";
418     estado += ",IP=";
419     estado += WiFi.localIP().toString();
420     estado += ",CAL=";
421     estado += calibracionOK ? "1" : "0";
422     estado += ",ARM=";
423     estado += medicionAutorizadaPorBoton ? "1" : "0";
424     estado += ",ENV=";
425     estado += enviando ? "1" : "0";
426
427     udp.beginPacket(receptorIP, UDP_DATA_PORT);
428     udp.print(estado);
429     udp.endPacket();
430 }
431
432 void enviarEstadoPeriodico() {
433     if (millis() - ultimoEnvioEstado >= INTERVALO_ESTADO_MS) {
434         ultimoEnvioEstado = millis();
435         enviarEstadoSistema();
436     }
437 }
438
439 // =====
440 // ETIQUETAS
441 // =====
442 String etiquetaSensor(int idx) {
443     int con = 0;
444     int pin = 0;
445
446     if (idx < 40) {
447         con = (idx / 8) + 1;
448         pin = (idx % 8) + 2;
449     } else {
450         int local = idx - 40;
451         con = (local / 8) + 6;
452         pin = (local % 8) + 2;
453     }
454
455     return "CON" + String(con) + " PIN" + String(pin);
```

```
456 }
457
458 // =====
459 // SERIAL
460 // =====
461 void imprimirCelda(int idx) {
462     if (valores[idx] > 0) {
463         char buf[12];
464         snprintf(buf, sizeof(buf), "%6.1f", porcentajeRelativo[idx]);
465         Serial.print(buf);
466     } else {
467         Serial.print("    .");
468     }
469 }
470
471 void imprimirFila(const int matriz[FILAS][COLUMNAS], int fila) {
472     Serial.print("[ ");
473
474     for (int col = 0; col < COLUMNAS; col++) {
475         int idx = matriz[fila][col];
476         imprimirCelda(idx);
477         Serial.print(" ");
478     }
479
480     Serial.println("]");
481 }
482
483 void mostrarMatrices() {
484     Serial.println();
485     Serial.println("RESPUESTA RELATIVA POR LECTURA");
486     Serial.println("El mayor sensor activo se representa como 100 %");
487     Serial.println("No representa fuerza absoluta ni porcentaje de peso corporal");
488     Serial.print("Maximo ADC usado para normalizar: ");
489     Serial.println(maximoVisualizacion);
490     Serial.println();
491     Serial.println("MATRIZ IZQUIERDA 10x4 [%]");
492     Serial.println("CON10 -> CON6");
493
494     for (int fila = 0; fila < FILAS; fila++) {
495         imprimirFila(matrizIzquierda, fila);
496     }
497
498     Serial.println();
499     Serial.println("MATRIZ DERECHA 10x4 [%]");
500     Serial.println("CON5 -> CON1");
501
502     for (int fila = 0; fila < FILAS; fila++) {
503         imprimirFila(matrizDerecha, fila);
504     }
505
506     Serial.println();
507     Serial.println("Sensores activos:");
508
509     bool hay = false;
510
511     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
512         if (valores[i] > 0) {
513             hay = true;
```

```
514     Serial.print("S");
515     Serial.print(i + 1);
516     Serial.print(" | indice ");
517     Serial.print(i);
518     Serial.print(" | ");
519     Serial.print(etiquetaSensor(i));
520     Serial.print(" | raw ");
521     Serial.print(raw[i]);
522     Serial.print(" | base ");
523     Serial.print(baseline[i]);
524     Serial.print(" | cambio ADC ");
525     Serial.print(valores[i]);
526     Serial.print(" | respuesta relativa ");
527     Serial.print(porcentajeRelativo[i], 1);
528     Serial.println(" %");
529 }
530 }
531 }
532
533 if (!hay) {
534     Serial.println("Ninguno.");
535 }
536 }
537
538 // =====
539 // SETUP
540 // =====
541 void setup() {
542     Serial.begin(115200);
543     delay(1500);
544
545     Serial.println();
546     Serial.println("=====");
547     Serial.println("ESP32-S3 EMISORA - 80 SENSORES");
548     Serial.println("Filtro calibrado + matrices actualizadas");
549     Serial.println("No envia hasta recibir ARMAR y detectar cambio calibrado > 4000");
550     Serial.println("=====");
551
552     pinMode(MUX_S0, OUTPUT);
553     pinMode(MUX_S1, OUTPUT);
554     pinMode(MUX_S2, OUTPUT);
555     pinMode(MUX_S3, OUTPUT);
556
557     digitalWrite(MUX_S0, LOW);
558     digitalWrite(MUX_S1, LOW);
559     digitalWrite(MUX_S2, LOW);
560     digitalWrite(MUX_S3, LOW);
561
562     analogReadResolution(12);
563
564     for (int i = 0; i < NUM_MUX; i++) {
565         analogSetPinAttenuation(ADC_MUX[i], ADC_11db);
566     }
567
568     calibrarReposo();
569
570     WiFi.mode(WIFI_STA);
571     WiFi.setSleep(false);
```

```
572     ultimoIntentoWiFi = millis() - INTERVALO_REINTENTO_WIFI_MS;
573 }
574
575 // =====
576 // LOOP
577 // =====
578
579 void loop() {
580     if (!gestionarWiFi()) {
581         static unsigned long ultimoMensajeWiFi = 0;
582
583         if (millis() - ultimoMensajeWiFi > 2000) {
584             Serial.println("WiFi no conectado. Esperando FSR_LOGGER...");
585             ultimoMensajeWiFi = millis();
586         }
587
588         delay(20);
589         return;
590     }
591
592     revisarComandosReceptor();
593     enviarEstadoPeriodico();
594
595     if (!medicionAutorizadaPorBoton) {
596         static unsigned long ultimoMensaje = 0;
597
598         if (millis() - ultimoMensaje > 2000) {
599             Serial.println("En espera. Presiona boton en receptora para tomar foto y armar medicion.");
600             ultimoMensaje = millis();
601         }
602
603         delay(20);
604         return;
605     }
606
607     leerTodosRaw();
608     calcularValores();
609     calcularPorcentajesRelativos();
610
611     bool disparoCambio = haySensorCambioMayorAInicio();
612
613     if (!enviando && disparoCambio) {
614         enviando = true;
615         inicioEnvio = millis();
616         ultimoEnvioDatos = millis() - INTERVALO_ENVIO_MS;
617         ultimoSerial = millis() - INTERVALO_SERIAL_MS;
618
619         Serial.println();
620         Serial.print("Cambio calibrado mayor a ");
621         Serial.print(UMBRAL_CAMBIO_INICIO);
622         Serial.print(" detectado. Max cambio: ");
623         Serial.println(maxCambioActual());
624         Serial.println("Iniciando envio de 5 segundos...");
625     }
626
627     if (enviando) {
628         if (millis() - ultimoEnvioDatos >= INTERVALO_ENVIO_MS) {
629             enviarDatos();
```

```
630     ultimoEnvioDatos = millis();
631 }
632
633 if (millis() - ultimoSerial >= INTERVALO_SERIAL_MS) {
634     mostrarMatrices();
635     ultimoSerial = millis();
636 }
637
638 if (millis() - inicioEnvio >= DURACION_ENVIO_MS) {
639     enviando = false;
640     medicionAutorizadaPorBoton = false;
641
642     Serial.println();
643     Serial.println("Finalizo el envio de 5 segundos.");
644     Serial.println("Emisora desarmada. Para repetir, presiona nuevamente el boton.");
645     enviarEstadoSistema();
646 }
647 }
648
649 delay(5);
650 }
```

Código 9.1: Código principal del ESP32-S3 lector.

Este anexo presenta el código principal implementado en el ESP32 receptor. El firmware gestiona la captura fotográfica de la huella plantar, la comunicación inalámbrica con el ESP32-S3 lector, el almacenamiento local en microSD, la generación del reporte HTML integrado y la descarga del último informe mediante una página web local accesible desde computador.

```

1  #include "esp_camera.h"
2  #include "Arduino.h"
3  #include "FS.h"
4  #include "SD_MMC.h"
5  #include "soc/soc.h"
6  #include "soc/rtc_cntl_reg.h"
7  #include <Preferences.h>
8  #include <WiFi.h>
9  #include <WiFiUdp.h>
10 #include <WebServer.h>
11 #include <time.h>
12 #include "mbedtls/base64.h"
13
14
15 #include <pgmspace.h>
16
17 const char LOGO_JAVERIANA_B64[] PROGMEM =
18 "
19 /9j/4AAQSkZJRgABAQAAQABAAQ/2wBDAAsICAoIBwsKCQoNDAsNERwSEQ8PESIZGhQcKSqrKigkJyctMkA3LTA9MCcnOEw5"
20 "PUNFSElIkZPZPU5GVEBHSEX/2wBDAQwNDREPESESEiFFLiCuRUUVFRUVFRUVFRUVFRUVFRUVFRUVFRUVFRUVFRUVFRUVF"
21 "RUVFRUVFRUVFRUVFRUX/wAARCAQALQDASIAAhEBAxEB/8QAGwABAAMBAQEBAIAAAAAAAAAAAQFBgMCAQf/xABBEAABAwmC"
22 "BQIDBgMFBgcAUAABAGMEAAUREiEGEzFBUSJhFHGBBxUjMqGxQLKRfNCwfAzNnSSsUEkJVNUotHx/8QAGABEAQEBAQAAAAAA"
23 "AAAAAAAAAAMBAGT/xAApEQACAgICAQMDBAMAAAAAAQIREiEDMUEiM1ETYXGRscHwOeHx/9oADAMBAAIRAxEAPwD9cPsl"
24 "AKUpQC1KUAPSlAKUrw++3GYW88sIbbSVKUegAoD3VJw5dpFzVcBjCjK5Egob5BJP9YPbwe+9ekvCX6NkcU3AIEHBcRrdUP"
25 "JGcJ+RyflVZzOpLmbdd10NsIQhMuMNMkgTpKcBJKc53qqisXZNYdqjWUqg3Nbk1UKa21mWkFQOK1IdSOpSfubuM1Y1Npr"
26 "s7TsUpSsNFKUoBS1KAUpSgFKUoBS1KAUpSgFKVGuE5m2w1yX9WhGBhIYSScACiV6D0SaiybnChLCJUthlZ3CXHAKn6VVx+J4"
27 "s5QYcYlRq9hXCVJAK05TuDsSNx9KzT1kusG6yIhZenxpHrbk9VoVnOnV/ONTycYqOe03UtEpmcTvS30eSxKb5kd5t1H8zag"
28 "ofpWb41VNQ1D+Gc/Bcd5bjrTkKV+ZHQE9R0716bXy7ZGvaGksSmiETUNjAcAvPxxdYkHJB9qmcVLfZtKJUJZCV/CvtvrSepSk"
29 "74P+ts0isZoSeUWZ5qFLaaWxFYmG0+Al9PwxRqSCN91D1EagT3z7V20zErU/AZmKkN0rCcttQabUnHKWlfrJwQD4rki+XF5"
30 "Uh6PJz8TqSGcKXyQSqkjSkjIG05zn2r6y89bFqVbwWofJkorQEDGHavT6lJkS+cireryS14IMuPMgvR1wA+zIW6EJcejKS"
31 "dROASdwpR1Lyc+PFfo6ELKEpKioqYKj1NYWFcpsyfBtgWJkKShLzi9WgwnCoc502w7VqLw4458NAZcU2uW5pUtJwUtGZUQ"
32 "exxtn3qfLbaT0+01bR3evFujOft+dGBWn1lTqQR+tsm3E0tpW2tKOKGQpJyD9ax15ZdamqZtdsDkeA2CENpG0coZBIG5IT00"
33 "+CcmuvD0V/h+3qnXZ58vyhlLcNJGxURGadgVktTtXL41jaZ0pvmKjYUqkg8URpk1qM91h1T2eWp1IwrBIxsTg5Sdj4q7qUou"
34 "PZNRNpUpSsNFKUoBS1KAUpSgFKUoBUafEj3GK7C1AKQ8ggpzvjjPltX2b0Yt7SHJCtKVuJaScfxKOBVFanFzOKH5risodjqq"
35 "wnslCXN0fqd/6V3GLrI5k10V6bFmavJhOmxbi2w2qQpDqtKntZogkY05CU48fKp8ZWMOhm3y3IL/AGGxAEoP9w5z/wApI9q8"
36 "OCVakXF1+k+uZJCwiYx1PfQnT1RjIHTGd81ws8NtSZjshouW5pnS611wvB150daog5IxpFAq7dq2RwNRDkX5UD4zyzy4Lqn"
37 "5T7qVNs5Xp5iNsDjwAcknbY1rrY8J9kjOKAVzmE6gobZxgg/XNZ+wthqe16U1pi3HS7DQ6vmlpSBsNW+5SSR4wRhsRrVc5c"
38 "MT3bdILpeUrKmXELORhKbY5HY7V6OnpdiLa2yqj30+QyqPzAgWmxkpx+E5j0J5xU437e5oxLkxAtuBIKA+NlywPc17b6h"
39 "h8R6VSPRP3FstEaM4WHVtOQZC84UjSAVEe+Wz/Wr/iNCnYsVttZadLaSh1PVS6j6ZHIrhI4Ut6o7hQSh8hRMhL6tZJGCT"
40 "+EnZ1wkTJ9wSgKbCYiCQQs6N1E+Mkg1z4jv33PeUpfCuyeTH0pCB6UrcWAAo9shJxXy009aLY3GnTWbZGSVaGo4Cn1pzKZPn"
41 "HUPB+ddbUmFes0u6uMksvuw89pL2VLUE4DZ3ydrIyP71tDzZeDveOJzgTpMhmbPbkr4MF+SpQ1PbrUAAKAJOAPy98/KvEmGmb"
42 "DkKhQ3Zdimz/AOY3BZTPxuCgHfQwApZLeY770GcylVOS0p9mq4rmJGo52T/AA4Uce+K42h5y3TdLREtXKXUzKZSov1b40uU"
43 "d8DKTn03cHpW+XiPCssOH7cHw3fJqm9biS602nZDwsDwrJGckjPgZOK0oIiYDkGqCDCeh2a4tvtBmKtC1NR10FxTadG4J8Z3"
44 "wOma48P3VMG3XyE9014KbZaURusLRqRn6AjV0acra04vGkzS0pSolrS1KAUpSgFKUoBS1KAUpOI4ibgYEN0knvOrTnwr1rOn"
45 "6Hr6VSPRP3FstEaM4WHVtOQZC84UjSAVEe+Wz/Wr/iNCnYsVttZadLaSh1PVS6j6ZHIrhI4Ut6o7hQSh8hRMhL6tZJGCT"
46 "k43HXarwkk1ZGUW26Itqz8i/RkuKJakW9sqGdg7gq/VJ/apN8j2eIFPSX1wHXgQpyMS1Sx3JABBG/Ujas7HTJmWdmVhfLSw"
47 "sAPNekuPLSEBCfCEJwCfY4ryt6MLlbeS4p6CynTzXPxa8NZSpxZJyAHMYGN/vPMPVaOM9UyR8e7f2VRoCMQOem00j1hRSg4C"
48 "hqOo9P4cY85qC9LmTWG1NuzESYiV174kJwJcGlyBKSVjCEg5296hSnZTNwV8sqscS4VKCPkU61NJKVepICkAS6lPferScial"
49 "tFjXx1rWp1Kn1hjmKLxbIUNJi6oxnPgVSkidtnyAy5CU2iQ/OCq48pmRFjuJS1S9y0Wh0CE7DPQEKbqxnyLnBjfdXYSLPfCk"
50 "UNuNBK/UO4ys9EfPBz5rzbVc4DafHYryFgYlXbYS4r5qKlGpQ27+4hSHUvtrQoYKvfDqBHyxU5NN+CtS8mYdhyOvPpYkuqf"
51 "UVVFOyFIlpOJ1cNad1A2G0mTip7b8ufKVIZM0sQQPXJDbaw14ydlYSMAjsT77iufYttwgtSJDTLJAULIU0YqCovCgQPSovgnq"

```

```
"cDfvXi60Lat0B0vKkVN8978TSQ61zLmEn0rUScaT001T3VRPosmL1b7jK0XaW7GmMgtqLOUB5o4IKin0B7g498GtLKDF1skh"
"cFLDYQ2VICBjKu2F0+KwiQ+LG82+s55wQhSC11SVbuOLRpWNoG/lz5qdyzcFRkNS3Ir7jbbL7AXrbCtIU0ojoWcbjNcSgr"
"70UjN19xKdmybbDKJctbEFKHUKV+dTiiOsn3BFTrrCadurstoHEBMe0jwXC4Dt7hJA/xv4gW9q73yYxLLjbbSNTkVC901a1Z"
"UkqG5T1IUP71WE6zsW2TBcirdSwuYjmx1LKkLUeit8kEHB98Vjkk6Ci2rNJS1K8h6RS1KAUpSgFKUoBS1KAqr6Q1MAqIAE1s"
"knt1rmvii1E6BJ01YVpd5auWcbH14x361941YbkQ4iH0gsfGM1wHpjVjf2yRVVHgrtxkNktOuVJPNQyrVlJqTwdcdJHTIxn"
"vVoqLjls1JtS0QmYyf7NWz7zUhqG0hK2ITCvxJCSHGpXg5JIHnc1ygcMP3hmMtbqUMs69LmqgUEKzkNoPVIJ/MrrgYdFYfkjp"
"u6IOkEISGHVZJ1obQ1Shv0C1LSMeE4rdAAAADAFUnyOPt8nEYZdmeTaJrrqYtwvDUVEIC3G3Gw46oDCcnYkD33/AhrQ2m0R"
"bcj4xctMjCTpd2ShIP5j10ScbqJJ2rE/am2gXW3KCEhS21ajjc+oda/TG20C01sISEaQNONseMVnI3hF320NLJr4Ku63KQWG"
"02V6A9JwvBS8ACnB6YPWs9wNcbgiAyJ7kREFRc0uOPfiqUfE56ZzWf4Gehw+KbguS4wylLawguEJA0obDPtXiXJiL+zV1jn"
"MqkplqUEahrAK1b461X6Sxo/G/1J/Uv1/k/U1GJco7z0tp9pQ00JS0HY9jjpWvUnhbZccLXEhW0hHrQFKSk1Q6Fzz4zjJ75q"
"dw03o4Lh11KkUuKQs5x1Vq05rJcG8TMWeZ0g31JbekPerfcGfVOKVe1ThCScsfBSUk1HLyXKuFZ96jKckyI6EaA11pKEFB9Wo"
"kFI90fI3/a06IbYui2ri85EfBbUy8oDUwp0yQojAwg4GDtuMHBrcwI8eJCaZiY+HSPw8HIwTnb23qv4kiNu21cooClxgV4P8"
"ap40H2Kc/XB7VyuVt0a+NJVWjdwTa0IZr93Uy045FbwjKg8ApXqCeow0vX51LnXWJcfor3cutzWdbS01C0502Uneqm2W1q"
"I2tYh0yoy2nL1LKJUsaVnBAJ6EEZx3Fe02kNyoOpxp5Dj1wbMdL69TqUJRggnfbaJxnbArpqN2YnKqNnS1K8p6BS1KAUpSgF"
"KUoBS1KAjTRFFYciy1N6HU4UhSgMis4ufPtEsMP3eK5FXgMPSGwd/wCvakqGD74wfnV3dbfCu+hUloc5r/ZvJA1J/rsR7Haq"
"N5h23TG4jU00y110tTimAzykfzLIBHXjJNW46qiU7shuz3rdd2p61w5aHZGFp61AKQEg9HU/1SdvBrYw50eeOXIzoWEnSo"
"Y1KT4I04Pzqk4bThkTrjKuuI7KQ4GQ0k0kBWkEaeuxJO/fHTXTiMxYSUy0B5FwWdLao2y1Y66tiCkDc5BxWzqTJfJkbSymb"
"9qTzartb0Jw1Sm2yVpByU5I61+1tSGVxEPpdQWdIVzNQ0485rL2fiBas/fca01Kk5E1ga2lkdioZA0P9Cpv9qLcmK1xUSSIT"
"hopdSyFIOT3AJIz7gV1NScVCujJINJuV9mk+z9y0vi2cHS2UuoXy9ePUdY02fatD9pIjM8NhADSHVvJ0gABRG+cve9iWVJGt1"
"p1Q3AdB1LH9qK9uX2yL1UudEWR09QUa2XI3yKeLMUEo0F1XwZMQ3wMw43h1cdtZUhJ3yCo49jUHI63WS+8PuXhp1pL6G9bby"
"SMrPZCh3PbyKu30JLXFKQw286t5W1IYjK0s+xxAa4G9WhdJxcg8uc2NaWCylTqz206c7/t3rE5KeaTNai44tjgSNL8KxW5q"
"VJX1SkJX1SgnYf68144mvjJiKgxvcuP0pYcUPS22CfUFLPpBxt9arPv2XNnhu8JVGgqICmYrnrQD3dxuE9uo+VbNEOM3E+fq"
"w2mPp08oJGnHjFcy9M8pLs2044xmQ1cn7XDULVxtXQWt1StDJLY1LLonSBkecfSrK0sua0TrxPZfmaSEISUhdAPUDHU+TVLGe"
"LM0Q3Cj2y4MRnltpaUPxUtg7HvrAHy2HerNjhqJc0NSJgiOMLAWhQIwGOKHUZP51fp8q61S70Y2+jSJUFJCKkEHcEd6+18Qh"
"LaEobSEoSMSJSkYAHivteY9ApS1AKUpQC1KUApS1AKrVWC30z3pr8cPvukZLp1AYGBgHYVZUrU2ujGk+yBLtDEgocZKoshYb"
"eWzCkeC0hHsazF9KKhBld9RHesShhaWnGXw0sKJGFB1IKemCQTW2rm9HZkDD7Lbg8LSD+9dwnT2cyha0YW3W1C1JkQ4iZDS2"
"wp91TxjlbmNy2RgkHvkY8Gqzid7titKEeC+JbvoDZfQ81RPNBJ/UVp7zZmnLpBYgWiK6nXHFHnKBjATqx1GSTp74HapiOFI"
"xLbrz7pknKHGcNjB/upGw+uT716FypNSZF8bekWkdX9ujjYkVpQhK1LPVWAP3rspTlSkBRQhSzpSdgFRxna/pwAmXadLk"
"sRnJE18h4Lb5rQfAQ1qYShHq1bEAZ3QxfZr6Y7L98j0Nttv/EM804U1BSRpyNg4nIPv2qX0nZ39VU00Vhm7W1yW04uEtCmi"
"pvGpKyQds7DI/akeFFchqFqtpWsk4L88BBPUeK0f0qbbWYfE8d1t+XNfabKSptb6FIVncboHXbnpIrnfOHXWITjsVhqcGs0J"
"Q620cncSc4Cv4x2KVb471RSSGg+zhpu5eCjDfSt6XyrrB5zJyw6pLQS/v6iM6SnBGCCY8mtfGt8y4xWRcpCUxdCRy16yeYM"
"dVr7g+Bgf0p0W129daHGYEdoqAVs0kEfpU4DAwK1Plvophjrrshv2mBJaS29DZU1AAT6ACkex7fSvdvt7NsiJixtYZQSuhSir"
"Tk5xk9qk0VqUkUrsUpSsnFKUoBS1KAUpSgFKquIrjItVqVLihpS0rQkpcBIIUoJ7H3rzEuzgusy3zuUDhBQ6HkelJqrI3B6"
"HI810nNqznJJOW9K4ibGLHO+Ia5Wd0vWNOFGa5rucJuMuQpWqGHEHSpzWCAfGfNZTNTeqlQTckfEehbC4wZU6EvAnY+PHXe"
"+z3Fy5riy/vNnS+2VMEkJJGemD1yB1/yrCHVMZK6L61RJvWaaZkch1hx9pBVy1vBP9T2HvXUSmklpDrRaHXR6Uax1Xy811M2"
"0ekx2UuFuxLSA4eqgkZP1r2pKVpKvAKSeoIyDVXfrrKtzcRUQMkvYUMK5oJxqQMjBHSu1ykSo5iCOWsuvJbXzEk7H04wfatxb"
"pmWia202ynS0hKe+EgAV6rg10iPOBtqSyTzYqLLGJ00u1co9wQtS0yHI7aucptsJeCtYHT6+1ZTNTeyLcTNihBWZDwgK01Ws"
"YB8f0ipsZDqWlyGUuKIAQVgEk9NvelMWjtSoUi4oSyFxiX7xDqUKCngkJJ33846DvUTI05qt9v1R5TbUnmNhKVYJUcAgA+x"
"NaotujHJJWJXFK5mQyHwXUB4jIb1DUR5xVXdrmqPcbZHjymwp6Ty3Wtiop0k/MdB/Wii26NbSLi1KvYakUPQC1Krr3dHLPAX"
"MTExJabB4ELAKU+dtak26RjdK2RuK0ombZVxobCnnVuIOAQMBKgo5JpTKX52bXHZegRvxKBkvtLV6ngn+Ekk7j0QCcbV2"
"4dv54hiqlNw3GI+dKvRwDqI67CpN7vEexWt2bJyUo2SgdVKPQVRZxahWzh4tZFDcLPMki5PNRDplyI6kMEpyAggqWd8AkbfS"
"vtxs8t431LEEFEdHtJkcpAckMau+x271o2pvxVsbmREC7mthxtGoDVkZxmQ008Y/et5XbE21919rPN5i0jQAcH57+K7jKb21"
"1/r/AActQ8vv+/yenIb713EpFtU20q3rZKfRsoqyE7H/Alb1Ei2ecgWVKYpYcJwnWHXRp9C1JCQdjvuM1c3y90WYMKTAd1Je"
"WGhlypB1noMHZx25XerBLR8e7b1q0J1PNJdtLsec9D9KxS1Spdhq07KkQZj/AAu/BdtARMREMCL1IicV0yDnOCfVvVfwhXJ"
"55otWz0tORndaVI1r0/mBJ0xHbG3XepVv4o1XS3fHQRK+6wc4IeQCddiasmrSUty2r1GiLdLjYcDGoBW04yDq1Uxft39Q1"
"FrS8X+DInW9sxUpMi0+3iQHsSBRSc6c9sjNA5JuD8cuQXozTCuavm1OVKAICQATnr19qqYHGjtOgyJkKzvsRzhzDqQrpK4H"
"farmxX2HxBB+KhFWadK0LGFIPgly4zitro1SjJ6ZRQRmJxrp/4DQ7HmuOu4KMPQRX3zv+Ybe1dPuaWu2zy1FDMxueqZD1ac"
"E5BHQ7ZAIpZqTxFxYOHJDSJNvecac2bcbWncJtkY6jrV5EedfJicfjmO4rct1QUU/UVr1NJSa7MUYt4oz02zvTIIjghqnRuQ"
"tp5ptwIIWoglfUZB3BrpGtRbvUp1VsTyTEabZ3ScKQFbA9RsQM+1T+IL/G4et41SQV61hCEJ6qJ/7ZNWtbiXW00NkKQsBSS0"
"4NcucsB0sY3RkPui4ItvwyY63mmpMdc0a0altBBUFHODjca9a+zbdcTEUy29Uhb8xMhp8LTunWk40TfIGKt0IeIlcPNh9"
"63uvRdgXW1p9JPYg7/WrG2XKNd4DUyGsLacH1B7g+4rr0aWVa0cYt42UMiJcXLOW+m26GmZhc1IUjK0qbKdRJ0cgnCDMDvXC"
"Nbrk0xaI71uUp2DMK3ZCVOcSQR1DJzvKZ0v1f5L19NrNqdQ41cU4U6Q3nAV7/KrtrCU1SjgDck1jnK0mJvFPaZ9pVYTe"
"IYvELUlyICEs01v1fxDsr5GrapNOLp1EO1aFkUrDRVvXQM8MXMH/ANsv9qtaquJ/92bn/wAMv9q6h7kcy9rKn70BjhCP7u0f"
"9VceKJdtn3F22XCSHppiMpQ1An8VeyTsP4QM/wCKu3BpdtvA8RwxnX1q1LS00AVKBUcdam8Kpl/CyV3GG7HmPpQdK8EKYfS"
"AQeqAAq8uU5T+5K04RiVX2a3T4uxLguKy7CPH9w7j9c1A4qSeHOM7dfwXpYkHlv4/of/jv9K9RI10tPG8u4xbTKVbpJiCSN"
"IO+CVAZ/m3+VaPi+1G9cNSGW21KfSk0tJxvqHb5kZH1rttR5b8S/k5Sb468o64Tc+IEqB1R7cnIPYurH+Sf+qnFn+6t0/wCH"
"X+1e+GraqlWGLHdyX9AW6VHJKz1z8un0rxb8S9YpmOHEekvSUFCEwBlPzJ01QVZpLpFX7G2Znhe8TbZw01ce1PiJbD8zFJ"
"Ofm05GDWBu8u1b0JSI21IATp6JGB0rKcKuzbJw8zBmWecp1sjwCwLcGqST/N71bxptxNokSpkJOPLVyoiaCtCe1Jd87n51"
```

```

109 "3yq5Nr50eN1FJ/BguF7+rh/he4v/AATz6VSS1LiCaEqKjRjVvn9K1vAnNtBLEJAFs8uaQ8Sj8qRjYD5b5qs4Ls0l1m3C0Xm3P"
110 "NtylFesgF0MAyYdsdsiunDDF54Xm02uVcElW5S8sSGcK0Z8j0wPfwarytSyUXv8AclxprFv/AIcvtPAKLrn/ANdX+Vb0dKwv"
111 "H0G53h+Gzb7c+6mKorU56Q1WcbDf2rU0XN9NqElu3S1vnYRykBQV774x71Kavjgl9ysXU5P8GV4r1W66SL1D1yUIVEYOMJUC"
112 "fxT6idh4CU/U1Z/Z9dfvLhlltasuxDyVfIf1/T9qncLNvs2YJmxXWZWPx7mAetaiSSMHcVmuH4t0sfE895u0yvuuYs4Hp1I"
113 "3yDjPufpXTQUHD40NqSn8mm41bbfYgMPIS429NaQpKhkEbn/ACrIPNy/s6vP0YC37HKV6kdSg+Pm03kVpuJnZqpVuTdt0iSm"
114 "PJRIdwJSBpAIwMnc71cyYrF2tymJbBL6MKbWMEf/RFcxnhFJ7T705RybrtFVALR7hxMqZFcs4y5b0FKx3/EVXTiq4N97Y11"
115 "14M/G0JY1/ypP5j/AMoP9ap+D+HJXD18ubLgU5FUHJZexsoZ03z33qcw9NmcWJkSLZKbhtMlphawnAUSNSiM5GQAP/2jUV00"
116 "7SMTe0+2ZvhyfDtfH0qJbDqQBPT+HpBASrqBv/iH1r9JrEcd2ufNn26TaYTTzsqKrUXE4CcZBA69cj9a1tul0zIaHX4rsV07K"
117 "acxkHvjHUU5aklNG8VxbiyVS1K85YVnn+HZsy4S1S7w8u3SdlQwAaf5c9h8utaGldRk49G0KfZ5bbQ021ttIShACUpA2Aha"
118 "vVKVyaKUpQClKUAr4pQSkqUQEGZJPQV9qHeIa7haJkRpehb7KkJV4JFau9mPo5t3qK6ht1s0qYdUEIeDZ0Ek4G/jPfpUmbL86"
119 "BhPynUqUhlBw0IGTgDjVxXzrFriRH4EhEppKGVN8v0jGBqCummv1qmKuby7mgxJ5afhPNpSsFQU5qISfAyDtjvTVBNk86"
120 "Rqo1xjy1NoQSHHGUVhBSchKum/SpVZyzi7sJcRJRFTbWkYKhkCXQdx88Vo6nNU9HcXaFKUrk6FKUoBS1KAUpSgFKUoBS1K"
121 "AUpsgFKUoBS1KAUpSgFKUoBS1KAUpSgFKUoBS1KAUpSgFKUoD//Z";
122
123 const char LOGO_NEUROPREMATUROS_B64[] PROGMEM =
124 " /9j/4AAQSkZJRgABAQAAQABAAD/2wBDAAGBgcGBQgHBwcJCQgKDBQNDAsLDBkSEw8UHRofHh0aHBwgJC4nICisIxwKDcp"
125 "LDAXNDQ0Hyc5PTgyPC4zNDL/2wBDAQkJCQwLDBgNDRgyIRwhMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIyMjIy"
126 "MjIyMjIyMjIyMjIyMjL/wAARCAACOALQDASIAAhEBAxEB/8QAAHAAABAAEFAQAAAAAAAAAAAAAAAAAYBAGQFBwMI/8QAPxAAAQMD"
127 "AwIEBAMECQMFAAAAAQACAwQFERIhMQZBEyJRYQcUgZEYqNEVI6HRM1JicoKxweHxCByKJkNTsvD/xAAaAQEAAQMBAAAAAA"
128 "AAAAAAAAABAUBAGMG/8QAKREAaGICAQMDAwUBAAAAAAAECAwQRJUSMRMIURRBCtTzUmGbkf/aAAwDAQACEQMRAD8A74iI"
129 "gKj1XK0cq5AEREAREQBERAEREAREQBEyIAImUQFDwrVceFagCIIAiIAiIgKj1XK0cqAqi8Z5hDHkvY0n80o4ysGCvkm1SA"
130 "xvjB0rQ4EN+vf/dZSNXJJm0WJUvbo3+HG1rpP7Wce3AWHU3uKmedRGMc/PHlGNx68rXPqJKmB0k88kPinzQwtGpo9CT3xzj"
131 "Hst41t+Tn01LhG7pq4S6RIWme4gNZqyeMrK1YbqfhqjoqmNYIomt82WlrRpOuHDgOccLai5Uj8skkaABnzclEoS+DMLIvJzn"
132 "5CZ9V5se2UB0bwWnjHBVGSse0nIw3YrQ6bPUnZeI1XDACXu4GcAerzfUqeJvIA8Nz+LssHMrJ3vdKxsZk1B2DqfnsBjdbJGs"
133 "paNia2IOY0uAL26hnhkk8cf43AfgtFC5s8890cf4jaJWtlaW8kh2PbbtxqXpG8+JnMhcAG70ADu4G/8Asnaaqw3bXteAwkEH"
134 "ghXLT298rpIH+YB4cC1wAwMnkdsFuVh8G8tFdwVceFasGwREQBERAEREBUcqqo0UdnfHKAwLgJcCSianBpDeNcb7rXvd"
135 "R/NFzo4nu/ow1wys3nAH3z6K2unLkgmpfHqLcBjQXFP/rad8jntndYTKnLmGiD6gZLXuJosBx3J7/wC67Ri9EWya3PhncLeJ"
136 "6im8Jg8BkzXpI04a05H+oUS6mv8AWNkMFM18EDz5ZiN5QMSLT6Z2z3UylqZY4pW50aycDPlw4NB4zjCi/UVNc6BnzEEZrVca"
137 "y0ZkjtlRn8rBnZzqZFG/05rgz9D0yvvvh5IU5zy81znGV35iSt+uTySpYHx0Ek1DMXsh5ilcSHEjhpBAyv03dL1L1U9rqhh"
138 "ggc7JLj+8cPydlNIWU1BrtjiaW07NvK3IHrn+a7ZuYVvrsr5Zrh9PnN91ncFhvIrjNJEfCl1/v4Xk5jOf4/qs253PUHQruIG"
139 "Bqe0c+6md41bb+rqWojcQ2drPGOHGrJwf4YP0TQ08uhrnUNAMztTbI8eY6v6oHqtZW1xrjdLwxCiyU5VQ+subhfH2yn+alx"
140 "0C5uhrnYLz7+3uo47q2/Sh1VTtihijbpd4UPkYM878Zx7LW3Ftd4gp698jptTQ8S02bngjt37LoFNDHb4qWCMeGY9LWSDAc"
141 "Pcfpv6qpzvJTLuPCLenDhXHUuWRWdr25gwNrTHOYf+dTWlrx6jPB22wVOW336z19KLkwhsQGlz5Ni0jsR6+nK5/W9Fy0c6Sh"
142 "q12748Nxb0B7A/wA/uvbp+23K1189Nrg8Z0bZmMc0OD8HGafyn/ZdMa7ukoZozzyqIwrdla5RNLtd4Z617IXAmV+pwLhsSc4ad"
143 "ucDnHc+yldSPuo1T1fJcImmeFsuob04cwjykbNyg+iyWVEKwtjglG4y4Bzt/EaOD9Nge+ym2R58fVPS5ezek5CtVI3h8Qc"
144 "MbjoYquJJCIIAiIAiIgKj1WTguieBvkHxzj1UkcGtc5xwByUMMjb3RwywZc3EgOZNVHZI8xJ+m/ooRdus5Yy2mtDwAwFrp8"
145 "Z1Qyc1v81tfiRdGwNgt1PgSVLnc7+7mA+UfU5+3uudE6Rj8x5Vpi090VORV5E9ScYm6st9bQzVlrjLNHVbyPJLNB3qfXlTmC"
146 "0F8cUzAHeta5r/psfZc8tFpludSY200MaMvkIzPhsPUqd0ELLXQIAzyyxs2a5wGW+23ZVXV1TGe4P3fdFt0qVzjpr2/JmOAJ"
147 "d4gc4ABuGdivKHxfDb4RaW74J/MmN0916Mq6c12moh00f3jcj6Zwpu/UdJQU7hBKypapcPK1jshvuTwqqyqiy2XbFFjZfXXHuk"
148 "z79QUsc17omw6xJK4ZYceVjceB2HK21moPlPm6ueCIVBne7xHOBww789sb/ZQmtD44opJpnunmBmp3yG9m5U16YuFA6GYM"
149 "NRHhrgB+NukAEjv6KfnyCVGjz2kTch3uV/8AIybrbaa6R4kw2VuGiRv4g0QB68ArNe12GPcXHfLmkbj9PreMMdV89J4sNOKV"
150 "hzE80LpHOPc7YbtY37L1qqcU3Up6mQRxM78nfsFVssDIYxw4YONHtsvGrZiQuKQj95gtB9sgkfwV7J2Swtl1je1zHN1B3Y"
151 "jso5X1N5gPzMTPTTqs0S2Au1AD9V0wMdW2bk+EQM/J9KGo+WS0nbHLW1JdtGoskAyRuQq7j9At1SNm80J0zJAA78WkEADsMc"
152 "BRS0V4q6KWVge/xXDdpwQBjge3CnFukj+VjDARq3wcn65VvkJxKnHak3ozRjTkcFFXbBVFDJyCiIAiIAiIgKj1VKoOUc3UC"
153 "DwUByx410kOXUENS4EwywNDXY2BBOR/r9VDX/jP3+67feoqavpzRzwsniHifv8A/u65V1JZ47PVsbE4up5gXNB5YRyM9+Vc"
154 "YlM4KLKjKhqbkja9HtAoqmYfmlA+zR/NSJz/AAM14/Luo50e/wD8arjJGwyhx+owP81IZmkwvA9CF5nqW/qZnpn6+mgQmns"
155 "Ffda6rLQGRte7XPLs31+q9KjpeoYwvpKqmrfdGXNp3gub9FJ7zDM+Sz0UbQaar5Mwi8rtLc7j05Kz6WnhpZT8rVrW5GDoYB+"
156 "nCmLqt0dcIhvpdUk3v50YVU01SI/EA8uxwMZC84qianEOMrmSgZDMHBBJ4Uh6xtgobmKqNuIarLiANG8c/flaLQ0sOE5zh"
157 "Scyuq6Eb15ZnpbcfU1S/OxJoa26RdKftDx2unMYeA6EE5z/L2UYikr+oblEyrmfJHnLgdmsA5w0xPCuF5vAhEiuk3h4xnS0v"
158 "x/ewqWipqKerY2HLzK/DmOP4j6knkqtrrxvdyW11U1XLt8k2pifD0jytG2nsF7cKyPysAKq97Y43S0IDWjJ9grGKS4R5aTb5Z"
159 "rOm4YzXXOgwTEypa5gHb0c/5BdNpG6ImAE6Q0Aar13SD3PdW15/FJOCPk/6rplD17RradTRqwn8/dd8uLTrtiNcmYFarj"
160 "wVcJvREQBERAEREBUcqqoOVcgNRXUjg90jPwHc49VzHrzV+1qVhP18HYD1LsfYlShAxwoD1/YZKmkbwU8X07tQa38ztjI"
161 "+hGfupmLaLPtIEV7dxIX0vViC70jfsydpb/AIuw/wAvqpvjbdctB0S6mnHdpae3t+im9kv8NdG2CoeGVQAAydpPce/so/V8"
162 "OUpetBb+St0rLSXpTf4JRE5k0QBAOnbfkK9sbWnPf1WCx5jdqbz7rKZUtIw4YPr2VNCaa0/JazhJcrwY16trrbpZINAdKPNF"
163 "ns8cfyXLYySJ726ME00Q44ongrrxe3Sxam7b84wudXC1qLnd6qekpZTHJIS01uAR674UyuzjTfB0xH2t7WjSsLh5Sxxd/Bb"
164 "SyWq4zh5JZBG/L3g8n0H81saLpaV5a6tkDG5/o2HJP6nspLFFDS04jiay0JgxgcNC0tyF4h5JU7Fpoo+Pfu3k/xUf6krzHA"
165 "23xAnunnwHADcNzxj1JXrcupY4nfL20fMVLjPdmJLQfb+sV12Dpuemk/aFODjV5Yx+5Znuff/JwFgXr7v8+Tyuaqt+tp5+"
166 "TY2S3GokelDdUJRL2BuHc1S200k10wulja15225x7rHtMemSvmKMDcaj91tKYP8znTCVrt2HGMD/VbX2uT0x61FpY8K"

```



```

167 "1XHhWqMSwiIgCIiAiICo5VytHKuQBWvaHjDmgj3VyICF3n4d2+4z0qKOV9FK45cONDo3H+72+hULu3Qd5teXxRNq4WjJfB+"
168 "Jv6t0/2XaFyX4xX4W+7dL2uskey0VVQ+auawHM7Y9JEe3IJ0477KTxlWQ++yPPFr1zrTNJS9QX02ERVDTI3syoBDh9eVto0s"
169 "an4xLbLGe+khw+66D07ahT9KWYir6djpGUzBJE9ocGOxkt39M4+ij9TV9KVHUTBZ47NF0+s1mbUxxNEQfE3L29tWM4JAwDt"
170 "nK5WRxrXucNP+jpXLJrWoz3+TUjqe1ED9+8E9jEVZJ1ZamDZ80n92PH+amR6MtA16KcNacD+Tj+K1p6WmpZP3FLCR/WjaAVr"
171 "DCw2/L/6ZszsuK4Siv8A9xVlWdNutz87B0g2+3H8V5yWa8XJwddKvwmHfwmH036Db7qcU9grCA572xeozlexgtdKyZ9XVte"
172 "yBwbIBkaXHjP8lJgsaj9tckVvKy0JM1vSNjo60aXw6c00jBmfu7/AG+ilTYYCcjXg5aS9oed/wDhelLFA2Jr6drQx4BBAxkd"
173 "ivYxNLw8saXtGAe4XGylz13Heqrsj2s8wWzQsMthoIB/DyPT2V8ELIWRMGgtGAM52RkLY30LWgajl2069Fy0qKhhWq48K1D"
174 "IREQBERAEREbUcQ5WjlXIAioeFDaP4hU10vtfbrVbq+uhtzxHWkTWi0JxJGACdTsY0cDgFATilcT+Mtxnqp6a40EEUtNOtW"
175 "QzVMrhkume5pEte2wDS7+81dQ6kvctro4oKGNs92rXGGhgPdN4yX09GNHmcfQY5IWg6i6VgpfhJebQ2V08vyacs807/xzT/0j"
176 "nn3Lh9sBAbi53v5yxULrPN+/vGhlJK31jXt10k/ws10/UAKJVCUVP8ZulLPRxaa2W+ioLaM8avLv7+UZPclab4IXF9b0s65X"
177 "SSOKkskLqOCR7sNa1x8WR5J4wNdfOB9VibXUOd3+M7LrRS+NSz9PHw5NBbkiCA70APBB44KAk1564stjubbsZUzTS1vheM+Gm"
178 "gfm6MKmcfvPhl33XtderrNardJwy1TahjJRD4VLiWROhbqDQ0d90XY9B1cx6Hv0EcvUk10Y6vq67XiWnbC7d0cbThrnjtEwZ"
179 "JPfGnla+zdE18trtOnPma2kv0V9kqfmv1/KYDH4Z1JP10uY52ADnUcYxnAHZ5btR1Bjo4L1TQ11TD4sET3t8QtIyHbH0SFCb"
180 "pFKyuqDUysqJI5I2zSNbpj1HgPHdRG12CGj/A0pG0mLpaj5ahE41qXa3yP8ACA1Z7HJ4GAMbALaVPUdR8a56etmZDYaeIyv"
181 "e1ziI5Mcy0A50RgHnAGEJFF/pN8bJ7VdUxdM2mKbQs00aebwqAGLY6SSYnGGtY3cn9FtLX1DbRU2P5aoa2d7XONNL+7maGu"
182 "Ou1RnzDDgQduVySPqejf8YK27dSxGkjt9ra610kwZL5yMYZ/8rg78I3GcdlmWqnu11+KtX1BfbdM+W52vNHDtW14bKXN/cah"
183 "sHho3JIB30cIcJPb2dkRYdu+c+TjNe+N1S7JeIhhrC9I9Q0M98Z74WYhgoeFarjwrUAREQBBERAEREbUcQ5WjlXIAeNlz63d"
184 "F3jpTqi73Dpyaglt12f401LWuewS5J1MLQdQ8x200266CiA09ssvytZJcK2X5u5TMDHzFulrGA50RtydLM78kk7knbHN+gH"
185 "V166U6wlg1S1NeZnBj3bGeQSYGTxhpjb7Yw+6gvVQ/4gvtMlymt9BRWZ9eXxcumMgYOkfnAHDe50N91H0j7+zo34J3G7CmaK"
186 "ulq6lpim8rznzGXSOP753GR7EIDbQOmvpP40WnpauIirLIdoaePEZB0iSTJbkC+Vo3U9pLdPVTU3UdvZqliqKhriChnjUrsM"
187 "DQTt/wC217e33UJ61qa+5fd+zvt1r4nzUt8g8WppWiEYIw7w9z+HURq76crs8MUdPCyGJJWRRtDGNAMBRsApogOX/Ee+/8A"
188 "bHSdTCrPbGwm53KrZSGsdTsJkOrJc8kb9jgnvupV0Ewt6bc6KeeajfVTGjfpIZHmEO0tOp25zgu+qivxxd+0ukZaSn+YrdJ"
189 "r3NBA8CGL8Tz+pIaB3yFRSmwdTUD/hxQXuGNraZtEzTBE0HgBnhNHRq8oHuEBpOsbfYoes7Xe33auoLy0Mox81E2TLJXFjTI"
190 "C0hoJJAJ+mcKRD0Xp39rUN0da4pK2hhZBBJIS7DwJDSQdiR2J3UK6uoZaF/R9tqJA+43W/RVldI387mDUQP7LfK0D0aFPKrr"
191 "Lp+gV9s9Rc4m3A6cwgOcWaiANRAw3JIG5HI9UBsJrTb56+OvmoKWSsiGI6h8LTIznhxGRye/dZwGyxam5UdHQTv1TUxxUsDX"
192 "011c4aWbV0T7K233SjulBBXUUmppxmN421fQ7520yAzEVNXsVhMvFBJVmlZUsMw0NO/P68f8H0QGaeFarictVqAiIaiIgC"
193 "IiAQ0VcrRyrkARFRAaWu6Ts9x6jo79VUviXckj80J5eQAM6hlvBwckZ4JWqZ0BbjXXIVUrqm11s01Sbc9o8NksjdmJs8nPIH"
194 "YknnGJgqYHogOUXczd7unn6GEt1rKqppnNZAZXV0ooydWoDhgBw71PHfCmFvvs9u6XFbfmta2mp2ufVwvD2VPADo2jzZdth"
195 "pGcuxuo/WdLXex/Eyby+y0rLhT3Cn8CtpDMI5Gny4cwu2I8rdsjupLT2qsutdT3C9sjiZT08S1oIn62Px/SPdgB7xvgAAw7"
196 "4yd0BiWwz11rutfeodFwvcbmzQnmngLS20D/C0knHLi5cq+CNTVV/8A6XqI3eBaK19fIT+HOAxkf6iTU/8AwR6AGN3XHC5"
197 "f8H+17jZp+pbdrKKSkmuVcfCjkGD4bX00ce5efsgMr4gwub1xORX6dQppKx+PUth1j/6qM9DVMc3w/jpbfJDW9U9TPnmkkG"
198 "sxAOIMsvo1gxpzy5wx3XT+prTJcI6CspWB9bbKptVCvnHiDBa9me2W0cB74Wvsp6YsLZ47NZZaWZ+80MFuka9x5wSW40Mnvh"
199 "AQDpa2Vvz+E9P0tQSOjvznTp6s1GdNM9k2vE2xPmLQA3k88ZK1HUfTtq/E/oW019zmqTI/xXmIGKFh8VznCNvIz3J30V2cz"
200 "3e5hzaalNqicfNUVG18xH9mMZApu47f1StN1P0FJeqp+4W65upbhZZTJFNUMM/jNOCWv8WJyRznufOBvVFnOpPDjckcykoY"
201 "yZcHHISv/C0+oa3J/VzfQrCpelzBen1omBY4NB9S1unS3GMA+QZdnfbo21ot5t1KY5JhPPJI+WeXTp1vcckgZOBwAM8ALYY"
202 "HogKAYBVfCrSvagCIiAiIgKjLXK0cq5AFhVtRNB0MUwsEOL8cjAzss1UwNfHVyuqtB0hvhBw2xkkfWfPTvhyxpzmNu"
203 "zmkEjzbH0WYIOU0/ohnaNU+tnETHYxzotYa5h87s/hHoePv7Koqq110kiEf/jxkZJZgYOA5Ds7n02MLaad87JjHCGG9kcZe"
204 "K/8AZ/ivY1snixN0pgaQHNBjWtjK7ErKqL1XRTyMhpWtRdEPEZxqI1ZHfY7Y+q3JbnY8KuCGNVHcJ56+opxE60LBEEpj07m"
205 "/iz687foV4uuVVFURpdJlmpTJ+AjmknwOD/ABhb2W7wad87IDUGurBcZymxa4hr0jTj01oIA0dySeP5Lybcqk09Q9ssMnh"
206 "xsf4mgsa1xJ1NOfQD6d1vNH/Aamn2QGLb531NJFK92SCg+XGSCR6n07bFZita3CuQFDwrVceFagCIiAiIaiIgKjLXIiAiIi"
207 "IAqiAiIqIhgiIIZCIiAiIaiIgKHhWoiAiIaiIgP//Z";

```

```

208
209 void escribirCadenaPROGMEM(File &file, const char* textoProgmem) {
210     const size_t CHUNK = 96;
211     char buffer[CHUNK + 1];
212
213     size_t len = strlen_P(textoProgmem);
214     size_t offset = 0;
215
216     while (offset < len) {
217         size_t n = min(CHUNK, len - offset);
218         memcpy_P(buffer, textoProgmem + offset, n);
219         buffer[n] = '\0';
220         file.print(buffer);
221         offset += n;
222     }
223 }
224

```

```

225
226
227
228 // -----
229 // DEBUG_SERIAL = 0 deja libre GPIO1/TXD para los LED indicadores.
230 // Si se cambia a 1, el monitor serial vuelve a funcionar, pero los LED conectados
231 // a GPIO1 pueden parpadear o comportarse de forma incorrecta por la salida UART.
232 // -----
233 #define DEBUG_SERIAL 0
234
235 #if DEBUG_SERIAL
236     #define DBG Serial
237 #else
238     struct NullSerialClass {
239         template<typename... Args> void begin(Args...) {}
240         template<typename... Args> void print(Args...) {}
241         template<typename... Args> void println(Args...) {}
242         template<typename... Args> void printf(Args...) {}
243     };
244     static NullSerialClass DBG;
245 #endif
246
247 #define BUTTON_PIN 3
248 #define LED_DUAL_PIN 1 // GPIO1 / TXD. Ver conexion especial de dos LED con un solo pin.
249
250 const char* AP_SSID = "FSR_LOGGER";
251 const char* AP_PASS = "12345678";
252
253 WiFiUDP udp;
254 WebServer servidorWeb(80);
255
256 const int UDP_DATA_PORT = 4210;
257 const int UDP_CMD_PORT = 4211;
258
259 IPAddress EMISOR_BROADCAST_IP(192, 168, 4, 255);
260
261 const unsigned long INTERVALO_REENVIO_ARMAR_MS = 1000;
262 const unsigned long TIEMPO_MAX_SIN_ESTADO_EMITOR_MS = 3500;
263 unsigned long ultimoEnvioArmar = 0;
264 unsigned long ultimoEstadoEmisor = 0;
265
266 #define PWDN_GPIO_NUM    32
267 #define RESET_GPIO_NUM  33
268
269 #define XCLK_GPIO_NUM    0
270 #define SIOD_GPIO_NUM    26
271 #define SIOC_GPIO_NUM    27
272
273 #define Y9_GPIO_NUM      35
274 #define Y8_GPIO_NUM      34
275 #define Y7_GPIO_NUM      39
276 #define Y6_GPIO_NUM      36
277 #define Y5_GPIO_NUM      21
278 #define Y4_GPIO_NUM      19
279 #define Y3_GPIO_NUM      18
280 #define Y2_GPIO_NUM      5
281
282 #define VSYNC_GPIO_NUM    25

```

```
283 #define HREF_GPIO_NUM      23
284 #define PCLK_GPIO_NUM      22
285
286 Preferences prefs;
287
288 bool lastReading = HIGH;
289 bool stableButtonState = HIGH;
290 unsigned long lastDebounceTime = 0;
291 const unsigned long debounceDelay = 80;
292
293 bool photoInProgress = false;
294 bool cameraOK = false;
295 bool sdOK = false;
296 bool emisorListo = false;
297
298 const int NUM_SENSORES = 80;
299 #define FILAS_MATRIZ 10
300 #define COLUMNAS_MATRIZ 4
301
302 const unsigned long DURACION_DATOS_MS = 5000;
303 const unsigned long TIEMPO_MAX_ESPERA_DATOS_MS = 60000; // Si no llega DATA con disparo > 4000, no se genera
                 informe.
304
305 bool sesionActiva = false;
306 bool esperandoPrimerDato = false;
307 bool ventanaDatosActiva = false;
308
309 unsigned long inicioVentanaDatos = 0;
310 uint32_t usuarioActual = 0;
311 uint32_t numeroMedicion = 0;
312
313 String carpetaUsuario = "";
314 String rutaHTML = "";
315 String nombreReporteActual = "";
316 String rutaFotoTemporal = "/foto_pendiente.jpg";
317 String ultimoReporteFinalizado = "";
318
319 // Reloj sincronizado desde el computador por WiFi.
320 // La ESP32 no tiene RTC; por eso la fecha real se recibe desde el PC antes de la medicion.
321 bool relojConfigurado = false;
322 uint32_t epochBaseUTC = 0;
323 unsigned long millisBaseReloj = 0;
324 int zonaHorariaHoras = -5; // Colombia UTC-5
325
326 bool fotoTemporalOK = false;
327 bool reporteCreado = false;
328 unsigned long inicioEsperaDatos = 0;
329 int ultimoDisparoRecibido = 0;
330
331 uint32_t muestrasGuardadas = 0;
332 int valorMaximoGlobal = 0;
333 int indiceMaximoGlobal = -1;
334 float tiempoMaximoGlobal = 0.0;
335
336
337 const int VALOR_MAXIMO = 4094;
338 const int UMBRAL_ACTIVACION = 80;
339
```

```

340 // Rangos de visualizacion relativa. Cada paquete de 80 sensores se normaliza
341 // respecto al mayor valor activo de esa misma lectura.
342 const float LIMITE_MUY_BAJO = 20.0f;
343 const float LIMITE_BAJO = 40.0f;
344 const float LIMITE_MEDIO = 60.0f;
345 const float LIMITE_ALTO = 80.0f;
346 const int UMBRAL_DISPARO_RECEPTOR = 4000; // La receptora solo crea informe si la emisora reporta cambio
      calibrado > 4000.
347
348 const bool USAR_EMOJIS_SERIAL = true;
349
350 // Prototipos necesarios porque algunas funciones auxiliares se usan antes de su definicion.
351 bool separarValores(String linea, int valores[]);
352 void enviarComandoEmisor(const char* comando);
353 void actualizarLEDs();
354 void descartarFramesCamara(int cantidad, int pausaMs);
355 void iniciarServidorWeb();
356 void atenderServidorWeb();
357 String fechaReporte();
358
359 const int matrizIzquierda[FILAS_MATRIZ][COLUMNAS_MATRIZ] = {
360     {76, 77, 78, 79},
361     {72, 73, 74, 75},
362     {68, 69, 70, 71},
363     {64, 65, 66, 67},
364     {60, 61, 62, 63},
365     {56, 57, 58, 59},
366     {52, 53, 54, 55},
367     {48, 49, 50, 51},
368     {44, 45, 46, 47},
369     {40, 41, 43, 42}
370 };
371
372 const int matrizDerecha[FILAS_MATRIZ][COLUMNAS_MATRIZ] = {
373     {36, 37, 38, 39},
374     {32, 33, 34, 35},
375     {28, 29, 30, 31},
376     {24, 25, 26, 27},
377     {20, 21, 22, 23},
378     {16, 17, 18, 19},
379     {12, 13, 14, 15},
380     {8, 9, 10, 11},
381     {4, 5, 6, 7},
382     {0, 1, 2, 3}
383 };
384
385 bool comunicacionEmisorVigente() {
386     if (!emisorListo) return false;
387     if (WiFi.softAPgetStationNum() <= 0) return false;
388     return (millis() - ultimoEstadoEmisor) <= TIEMPO_MAX_SIN_ESTADO_EMITOR_MS;
389 }
390
391 bool sistemaListoParaFoto() {
392     return cameraOK &&
393         sdOK &&
394         comunicacionEmisorVigente() &&
395         !photoInProgress &&
396         !sesionActiva &&

```

```
397         !esperandoPrimerDato &&
398         !ventanaDatosActiva;
399     }
400
401     bool etapaSensoresActiva() {
402         // LED2 se enciende despues de capturar la foto y permanece encendido
403         // mientras la emisora esta armada, esperando apoyo valido o enviando datos.
404         return sesionActiva && (esperandoPrimerDato || ventanaDatosActiva);
405     }
406
407     void apagarIndicadores() {
408         // Alta impedancia: con la conexcion complementaria, ambos LED quedan apagados.
409         pinMode(LED_DUAL_PIN, INPUT);
410     }
411
412     void encenderLED1ListoVidrio() {
413         // LED1 ROJO / LISTO:
414         // 3.3V -> resistencia -> anodo LED rojo -> catodo LED rojo -> GPIO1/TXD.
415         // Se enciende cuando GPIO1 esta en LOW.
416         pinMode(LED_DUAL_PIN, OUTPUT);
417         digitalWrite(LED_DUAL_PIN, LOW);
418     }
419
420     void encenderLED2CamaSensores() {
421         // LED2 AZUL / CAMA DE SENSORES:
422         // GPIO1/TXD -> resistencia -> anodo LED azul -> catodo LED azul -> GND.
423         // Se enciende cuando GPIO1 esta en HIGH.
424         pinMode(LED_DUAL_PIN, OUTPUT);
425         digitalWrite(LED_DUAL_PIN, HIGH);
426     }
427
428     void actualizarLEDs() {
429         if (etapaSensoresActiva()) {
430             encenderLED2CamaSensores();
431         } else if (sistemaListoParaFoto()) {
432             encenderLED1ListoVidrio();
433         } else {
434             apagarIndicadores();
435         }
436     }
437
438     void inicializarLEDs() {
439         apagarIndicadores();
440     }
441
442     bool initCamera() {
443         camera_config_t config;
444
445         config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
446         config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
447
448         config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
449         config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
450         config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
451         config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
452         config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
453         config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;
454         config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;
```



```
455 config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
456
457 config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
458 config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
459 config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
460 config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
461
462 config.pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
463 config.pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
464
465 config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
466 config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
467
468 config.xclk_freq_hz = 20000000;
469 config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;
470
471 config.frame_size = FRAMESIZE_VGA;
472 config.jpeg_quality = 12;
473
474 if (psramFound()) {
475     DBG.println("PSRAM detectada");
476     config.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM;
477     config.fb_count = 2;
478     config.grab_mode = CAMERA_GRAB_LATEST;
479 } else {
480     DBG.println("ADVERTENCIA: PSRAM no detectada");
481     config.fb_location = CAMERA_FB_IN_DRAM;
482     config.fb_count = 1;
483     config.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY;
484 }
485
486 esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
487
488 if (err != ESP_OK) {
489     DBG.printf("Error iniciando camara: 0x%x\n", err);
490     return false;
491 }
492
493 sensor_t *s = esp_camera_sensor_get();
494
495 if (s == NULL) {
496     DBG.println("Error: sensor de camara no detectado");
497     return false;
498 }
499
500 s->set_framesize(s, FRAMESIZE_VGA);
501 s->set_quality(s, 12);
502 s->set_brightness(s, 0);
503 s->set_contrast(s, 0);
504 s->set_saturation(s, 0);
505
506 delay(1200);
507
508 // Limpia cuadros antiguos generados durante el arranque. Esto evita que el
509 // informe use una imagen previa al momento real del boton.
510 descartarFramesCamara(5, 80);
511
512 camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get();
```

```
513
514 if (!fb) {
515     DBG.println("Error: la camara no entrego imagen en la prueba inicial");
516     return false;
517 }
518
519 DBG.print("Captura inicial OK. Tamano imagen: ");
520 DBG.print(fb->len);
521 DBG.println(" bytes");
522
523 esp_camera_fb_return(fb);
524
525 return true;
526 }
527
528 bool initSD() {
529     DBG.println("Iniciando microSD en modo original 4-bit...");
530
531     if (!SD_MMC.begin("/sdcard", false)) {
532         DBG.println("Error: no se pudo montar la microSD");
533         return false;
534     }
535
536     if (SD_MMC.cardType() == CARD_NONE) {
537         DBG.println("Error: no hay microSD insertada");
538         return false;
539     }
540
541     DBG.println("MicroSD iniciada correctamente");
542     DBG.print("Tamano microSD: ");
543     DBG.print(SD_MMC.cardSize() / (1024 * 1024));
544     DBG.println(" MB");
545
546     return true;
547 }
548
549 void initWiFiAP() {
550     WiFi.mode(WIFI_AP);
551     WiFi.softAP(AP_SSID, AP_PASS);
552
553     DBG.print("Red WiFi creada: ");
554     DBG.println(AP_SSID);
555
556     DBG.print("IP del receptor: ");
557     DBG.println(WiFi.softAPIP());
558
559     udp.begin(UDP_DATA_PORT);
560
561     DBG.print("Escuchando datos UDP en puerto ");
562     DBG.println(UDP_DATA_PORT);
563 }
564
565 void enviarComandoEmisor(const char* comando) {
566     for (int i = 0; i < 3; i++) {
567         udp.beginPacket(EMISOR_BROADCAST_IP, UDP_CMD_PORT);
568         udp.print(comando);
569         udp.endPacket();
570         delay(20);
```

```
571 }
572
573 DBG.print("Comando enviado a emisora: ");
574 DBG.println(comando);
575 }
576
577 void mantenerEmisorArmado() {
578     if (sesionActiva && esperandoPrimerDato) {
579         if (millis() - ultimoEnvioArmar >= INTERVALO_REENVIO_ARMAR_MS) {
580             enviarComandoEmisor("ARMAR");
581             ultimoEnvioArmar = millis();
582         }
583     }
584 }
585
586 void descartarFramesCamara(int cantidad, int pausaMs) {
587     for (int i = 0; i < cantidad; i++) {
588         camera_fb_t *fb = esp_camera_fb_get();
589
590         if (fb) {
591             esp_camera_fb_return(fb);
592         }
593
594         delay(pausaMs);
595     }
596 }
597
598 camera_fb_t* captureWithRetries() {
599     camera_fb_t *fb = NULL;
600
601     for (int i = 1; i <= 5; i++) {
602         DBG.print("Intento de captura ");
603         DBG.print(i);
604         DBG.println(" de 5");
605
606         fb = esp_camera_fb_get();
607
608         if (fb) {
609             DBG.print("Imagen capturada. Tamano: ");
610             DBG.print(fb->len);
611             DBG.println(" bytes");
612             return fb;
613         }
614
615         delay(500);
616     }
617
618     return NULL;
619 }
620
621 bool escribirBase64EnArchivo(File &file, const uint8_t* data, size_t len) {
622     const size_t IN_CHUNK = 768;
623     uint8_t out[1032];
624
625     size_t offset = 0;
626
627     while ((len - offset) > IN_CHUNK) {
628         size_t outLen = 0;
```

```
629
630     int ret = mbedtls_base64_encode(
631         out,
632         sizeof(out),
633         &outLen,
634         data + offset,
635         IN_CHUNK
636     );
637
638     if (ret != 0) return false;
639
640     file.write(out, outLen);
641     offset += IN_CHUNK;
642 }
643
644 size_t remaining = len - offset;
645
646 if (remaining > 0) {
647     size_t outLen = 0;
648
649     int ret = mbedtls_base64_encode(
650         out,
651         sizeof(out),
652         &outLen,
653         data + offset,
654         remaining
655     );
656
657     if (ret != 0) return false;
658
659     file.write(out, outLen);
660 }
661
662 return true;
663 }
664
665 bool escribirBase64ArchivoDesdeSD(File &html, String fotoPath) {
666     File foto = SD_MMC.open(fotoPath.c_str(), FILE_READ);
667
668     if (!foto) {
669         DBG.println("ERROR: No se pudo abrir la foto temporal para convertirla a Base64");
670         return false;
671     }
672
673     const size_t IN_CHUNK = 768;
674     uint8_t in[IN_CHUNK];
675     uint8_t out[1032];
676
677     while (foto.available()) {
678         size_t len = foto.read(in, IN_CHUNK);
679         if (len == 0) break;
680
681         size_t outLen = 0;
682         int ret = mbedtls_base64_encode(out, sizeof(out), &outLen, in, len);
683
684         if (ret != 0) {
685             foto.close();
686             DBG.println("ERROR: Fallo la conversion Base64 de la foto temporal");
```

```
687     return false;
688 }
689
690 html.write(out, outLen);
691 }
692
693 foto.close();
694 return true;
695 }
696
697 bool capturarFotoTemporal() {
698     if (!cameraOK || !sdOK) return false;
699
700     photoInProgress = true;
701     actualizarLEDs();
702
703     if (SD_MMC.exists(rutaFotoTemporal.c_str())) {
704         SD_MMC.remove(rutaFotoTemporal.c_str());
705         delay(80);
706     }
707
708     // Punto critico: al presionar el boton, la camara puede tener en memoria un
709     // cuadro anterior. Por eso se espera un instante y se descartan varios frames
710     // antes de guardar la foto definitiva del informe.
711     delay(350);
712     descartarFramesCamara(6, 90);
713
714     camera_fb_t *fb = captureWithRetries();
715
716     if (!fb) {
717         photoInProgress = false;
718         actualizarLEDs();
719         return false;
720     }
721
722     File foto = SD_MMC.open(rutaFotoTemporal.c_str(), FILE_WRITE);
723
724     if (!foto) {
725         esp_camera_fb_return(fb);
726         photoInProgress = false;
727         actualizarLEDs();
728         DBG.println("ERROR: No se pudo crear la foto temporal");
729         return false;
730     }
731
732     size_t escritos = foto.write(fb->buf, fb->len);
733     foto.flush();
734     foto.close();
735
736     size_t tamanoCapturado = fb->len;
737     esp_camera_fb_return(fb);
738
739     if (escritos != tamanoCapturado) {
740         SD_MMC.remove(rutaFotoTemporal.c_str());
741         fotoTemporalOK = false;
742         photoInProgress = false;
743         actualizarLEDs();
744         DBG.println("ERROR: La foto temporal no se escribio completa en la microSD");
```

```

745     return false;
746 }
747
748 File verificacion = SD_MMC.open(rutaFotoTemporal.c_str(), FILE_READ);
749 if (!verificacion || verificacion.size() == 0) {
750     if (verificacion) verificacion.close();
751     fotoTemporalOK = false;
752     photoInProgress = false;
753     actualizarLEDs();
754     DBG.println("ERROR: La foto temporal quedo vacia o no se pudo verificar");
755     return false;
756 }
757
758 DBG.print("Foto temporal capturada y verificada. Tamano: ");
759 DBG.print(verificacion.size());
760 DBG.println(" bytes");
761 verificacion.close();
762
763 fotoTemporalOK = true;
764 photoInProgress = false;
765 actualizarLEDs();
766
767 DBG.println("Foto temporal capturada. El informe se creara solo si llega DATA con disparo calibrado > 4000."
768 );
769 return true;
770 }
771
772 uint32_t obtenerEpochActualUTC() {
773     if (!relojConfigurado) return 0;
774     return epochBaseUTC + ((millis() - millisBaseReloj) / 1000UL);
775 }
776
777 String formatearFechaHoraDesdeEpoch(uint32_t epochUTC, bool paraArchivo) {
778     if (epochUTC == 0) {
779         return paraArchivo ? String("sin_fecha") : String("Fecha y hora no configuradas");
780     }
781
782     time_t localEpoch = (time_t)epochUTC + ((time_t)zonaHorariaHoras * 3600);
783     struct tm tiempoLocal;
784     gmtime_r(&localEpoch, &tiempoLocal);
785
786     char buffer[32];
787
788     if (paraArchivo) {
789         snprintf(buffer, sizeof(buffer), "%02d_%02d_%04d",
790             tiempoLocal.tm_mday,
791             tiempoLocal.tm_mon + 1,
792             tiempoLocal.tm_year + 1900);
793     } else {
794         snprintf(buffer, sizeof(buffer), "%02d/%02d/%04d %02d:%02d:%02d",
795             tiempoLocal.tm_mday,
796             tiempoLocal.tm_mon + 1,
797             tiempoLocal.tm_year + 1900,
798             tiempoLocal.tm_hour,
799             tiempoLocal.tm_min,
800             tiempoLocal.tm_sec);
801     }

```

```
802     return String(buffer);
803 }
804
805 String fechaReporte() {
806     if (relojConfigurado) {
807         return formatearFechaHoraDesdeEpoch(obtenerEpochActualUTC(), false);
808     }
809
810     String fecha = "Fecha y hora no configuradas";
811     fecha += " | tiempo interno: ";
812     fecha += String(millis() / 1000);
813     fecha += " s desde encendido";
814     return fecha;
815 }
816
817 String dosDigitos(int numero) {
818     if (numero < 10) return "0" + String(numero);
819     return String(numero);
820 }
821
822 int numeroMesDesdeTexto(String mesTxt) {
823     if (mesTxt == "Jan") return 1;
824     if (mesTxt == "Feb") return 2;
825     if (mesTxt == "Mar") return 3;
826     if (mesTxt == "Apr") return 4;
827     if (mesTxt == "May") return 5;
828     if (mesTxt == "Jun") return 6;
829     if (mesTxt == "Jul") return 7;
830     if (mesTxt == "Aug") return 8;
831     if (mesTxt == "Sep") return 9;
832     if (mesTxt == "Oct") return 10;
833     if (mesTxt == "Nov") return 11;
834     if (mesTxt == "Dec") return 12;
835     return 0;
836 }
837
838 String fechaArchivoReporte() {
839     if (!relojConfigurado) return "sin_fecha";
840     return formatearFechaHoraDesdeEpoch(obtenerEpochActualUTC(), true);
841 }
842
843 String nombreBaseReporte() {
844     return String("Reporte ") + fechaArchivoReporte();
845 }
846
847 String extraerNombreArchivoSinExtension(String path) {
848     int slash = path.lastIndexOf('/');
849     int inicio = (slash >= 0) ? slash + 1 : 0;
850     int punto = path.lastIndexOf('.');
851
852     if (punto < inicio) punto = path.length();
853     return path.substring(inicio, punto);
854 }
855
856 String construirRutaReporteUnica() {
857     // La ruta vuelve a ser por Usuario para no depender de una fecha interna sin RTC.
858     // La fecha real se escribe dentro del HTML cuando el computador sincroniza la hora.
859     uint32_t nuevoUsuario = prefs.getUInt("usuarioNum", 0) + 1;
```

```
860 String carpeta = "/Usuario_" + String(nuevoUsuario);
861
862 while (SD_MMC.exists(carpeta.c_str())) {
863     nuevoUsuario++;
864     carpeta = "/Usuario_" + String(nuevoUsuario);
865 }
866
867 usuarioActual = nuevoUsuario;
868 carpetaUsuario = carpeta;
869
870 return carpetaUsuario + "/Usuario_" + String(usuarioActual) + ".html";
871 }
872
873 int maximoValoresActivos(const int valores[]) {
874     int maximo = 0;
875
876     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
877         if (valores[i] > maximo) {
878             maximo = valores[i];
879         }
880     }
881
882     return maximo;
883 }
884
885 float calcularPorcentajeRelativo(int valor, int maximoMedicion) {
886     if (valor <= 0 || maximoMedicion <= 0) return 0.0f;
887
888     float porcentaje = ((float)valor * 100.0f) / (float)maximoMedicion;
889
890     if (porcentaje < 0.0f) porcentaje = 0.0f;
891     if (porcentaje > 100.0f) porcentaje = 100.0f;
892
893     return porcentaje;
894 }
895
896 String claseColorHTML(float porcentaje) {
897     if (porcentaje <= 0.0f) return "none";
898     if (porcentaje <= LIMITE_MUY_BAJO) return "very-low";
899     if (porcentaje <= LIMITE_BAJO) return "low";
900     if (porcentaje <= LIMITE_MEDIO) return "medium";
901     if (porcentaje <= LIMITE_ALTO) return "high";
902     return "very-high";
903 }
904
905 String nombreZonaPorPorcentaje(float porcentaje) {
906     if (porcentaje <= 0.0f) return "Sin apoyo detectado";
907     if (porcentaje <= LIMITE_MUY_BAJO) return "Muy bajo";
908     if (porcentaje <= LIMITE_BAJO) return "Bajo";
909     if (porcentaje <= LIMITE_MEDIO) return "Medio";
910     if (porcentaje <= LIMITE_ALTO) return "Alto";
911     return "Muy alto";
912 }
913
914 String simboloColorSerial(float porcentaje) {
915     if (porcentaje <= 0.0f) return ".";
916     if (porcentaje <= LIMITE_MUY_BAJO) return USAR_EMOJIS_SERIAL ? "" : "VERDE_CLARO";
917     if (porcentaje <= LIMITE_BAJO) return USAR_EMOJIS_SERIAL ? "" : "VERDE_OSCURO";
```



```

918     if (porcentaje <= LIMITE_MEDIO) return USAR_EMOJIS_SERIAL ? "" : "AMARILLO";
919     if (porcentaje <= LIMITE_ALTO) return USAR_EMOJIS_SERIAL ? "" : "NARANJA";
920     return USAR_EMOJIS_SERIAL ? "" : "ROJO";
921 }
922
923 String etiquetaFilaSensor(int fila) {
924     const char letras[] = "ABCDEFGHIJ";
925     if (fila >= 0 && fila < FILAS_MATRIZ) {
926         String etiqueta = "";
927         etiqueta += letras[fila];
928         return etiqueta;
929     }
930     return "?";
931 }
932
933 String nombreSensorPorIndice(int indice) {
934     // Etiqueta visual para el informe: A1-A4, B1-B4, ..., J1-J4.
935     // No cambia la conexi3n electrica ni el orden interno de lectura.
936     for (int fila = 0; fila < FILAS_MATRIZ; fila++) {
937         for (int col = 0; col < COLUMNAS_MATRIZ; col++) {
938             if (matrizIzquierda[fila][col] == indice || matrizDerecha[fila][col] == indice) {
939                 return etiquetaFilaSensor(fila) + String(col + 1);
940             }
941         }
942     }
943
944     return "S" + String(indice + 1);
945 }
946
947 String matrizPorIndice(int indice) {
948     return (indice < 40) ? "Derecha" : "Izquierda";
949 }
950
951 void actualizarResumenGlobal(int valores[]) {
952     muestrasGuardadas++;
953
954     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
955         if (valores[i] > valorMaximoGlobal) {
956             valorMaximoGlobal = valores[i];
957             indiceMaximoGlobal = i;
958
959             if (ventanaDatosActiva && inicioVentanaDatos > 0) {
960                 tiempoMaximoGlobal = (millis() - inicioVentanaDatos) / 1000.0;
961             } else {
962                 tiempoMaximoGlobal = 0.0;
963             }
964         }
965     }
966 }
967
968
969 void escribirTexto(String path, String texto, bool appendMode) {
970     File file;
971
972     if (appendMode) {
973         file = SD_MMC.open(path.c_str(), FILE_APPEND);
974     } else {
975         file = SD_MMC.open(path.c_str(), FILE_WRITE);

```

```
976 }
977
978 if (!file) {
979     DBG.print("ERROR: No se pudo abrir archivo: ");
980     DBG.println(path);
981     return;
982 }
983
984 file.print(texto);
985 file.close();
986 }
987
988 String construirCeldaHTML(int valores[], int indice, int maximoMedicion) {
989     float porcentaje = calcularPorcentajeRelativo(valores[indice], maximoMedicion);
990     String colorClass = claseColorHTML(porcentaje);
991
992     String html = "";
993
994     html += "<div class='cell ";
995     html += colorClass;
996     html += "-bg'>";
997
998     html += "<span class='dot ";
999     html += colorClass;
1000     html += "></span>";
1001
1002     html += "<div class='value'>";
1003     html += String(porcentaje, 1);
1004     html += " %</div>";
1005
1006     html += "<div class='label'>";
1007     html += nombreSensorPorIndice(indice);
1008     html += "</div>";
1009
1010     html += "</div>\n";
1011
1012     return html;
1013 }
1014
1015 bool crearHTMLConFoto(String path) {
1016     if (!cameraOK || !sdOK) return false;
1017
1018     photoInProgress = true;
1019
1020     camera_fb_t *fb = captureWithRetries();
1021
1022     if (!fb) {
1023         photoInProgress = false;
1024         return false;
1025     }
1026
1027     File file = SD_MMC.open(path.c_str(), FILE_WRITE);
1028
1029     if (!file) {
1030         esp_camera_fb_return(fb);
1031         photoInProgress = false;
1032         return false;
1033     }
```

```

1034
1035 file.println("<!DOCTYPE html>");
1036 file.println("<html lang='es'>");
1037 file.println("<head>");
1038 file.println("<meta charset='UTF-8'>");
1039 file.println("<meta name='viewport' content='width=device-width, initial-scale=1.0'>");
1040
1041 file.print("<title>");
1042 file.print(nombreReporteActual.length() > 0 ? nombreReporteActual : String("Reporte de apoyo plantar"));
1043 file.println("</title>");
1044
1045 file.println("<style>");
1046 file.println(":root{--text:#172033;--muted:#64748b;--card:#ffffff;--line:#e2e8f0;--very-low:#86efac;--low
: #15803d;--medium:#facc15;--high:#f97316;--very-high:#dc2626;--teal:#0f766e;--cyan:#14b8a6;});");
1047 file.println("*.box-sizing:border-box");
1048 file.println("body{margin:0;font-family:Arial,Helvetica,sans-serif;background:radial-gradient(circle at top
left,#9fff6 0,#eef4ff 34%,#f8f9fc 100%);color:var(--text);}");
1049 file.println(".page{max-width:1320px;margin:28px auto;background:var(--card);border-radius:28px;box-shadow:0
24px 80px rgba(15,23,42,.18);overflow:hidden;border:1px solid rgba(255,255,255,.8);}");
1050 file.println(".hero{background:linear-gradient(135deg,#0f766e,#14b8a6,#84cc16);color:white;padding:30px 36px
;position:relative;}");
1051 file.println(".hero h1{margin:0;font-size:36px;letter-spacing:-.7px;}");
1052 file.println(".hero p{margin:9px 0 0;font-size:15px;opacity:.96;}");
1053 file.println(".content{padding:30px 36px;}");
1054 file.println(".card{background:#f8f9fc;border:1px solid var(--line);border-radius:22px;padding:24px;margin-
bottom:24px;}");
1055 file.println(".card h2{margin:0 0 16px;font-size:23px;color:#0f172a;}");
1056 file.println(".photo{width:100%;max-height:540px;object-fit:contain;border-radius:20px;background:#111827;
border:1px solid #d1d5db;box-shadow:0 12px 28px rgba(15,23,42,.15);}");
1057 file.println(".toolbar{display:flex;align-items:center;justify-content:space-between;gap:14px;flex-wrap:wrap
;background:white;border:1px solid var(--line);border-radius:18px;padding:14px 16px;margin:18px 0;
position:sticky;top:10px;z-index:10;box-shadow:0 10px 28px rgba(15,23,42,.08);}");
1058 file.println(".toolbar-info{font-size:14px;color:var(--muted);}");
1059 file.println(".toggle-btn{border:0;border-radius:999px;background:linear-gradient(135deg,#0f766e,#14b8a6);
color:white;font-weight:800;padding:12px 18px;cursor:pointer;box-shadow:0 10px 22px rgba(20,184,166,.28);
font-size:14px;}");
1060 file.println(".legend{display:flex;gap:14px;flex-wrap:wrap;margin-top:12px;font-size:14px;}");
1061 file.println(".legend span{display:inline-flex;align-items:center;gap:8px;background:white;border:1px solid
var(--line);border-radius:999px;padding:8px 12px;}");
1062 file.println(".dot{width:24px;height:24px;border-radius:50%;display:inline-block;box-shadow:inset 0 -4px 8px
rgba(0,0,0,.18),0 5px 12px rgba(0,0,0,.18);}");
1063 file.println(".none{background:#ffffff;box-shadow:none;border:1px solid #ffffff;}");
1064 file.println(".very-low{background:var(--very-low);}.low{background:var(--low);}.medium{background:var(--
medium);}.high{background:var(--high);}.very-high{background:var(--very-high);}");
1065 file.println(".none-bg{background:#ffffff;border-color:#ffffff;box-shadow:none;}");
1066 file.println(".very-low-bg{background:#f0fdf4;border-color:#bbf7d0;}.low-bg{background:#dcfce7;border-color
:#4ade80;}.medium-bg{background:#fefce8;border-color:#fde047;}.high-bg{background:#fff7ed;border-color:#
fb923c;}.very-high-bg{background:#fef2f2;border-color:#f87171;}");
1067 file.println(".matrices-wrap{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:28px;margin-top:18px;align-items
:start;}");
1068 file.println(".matrix-panel{background:white;border:1px solid var(--line);border-radius:20px;padding:18px;}");
1069 file.println(".matrix-panel h4{margin:0 0 14px;font-size:18px;color:#0f172a;text-align:center;}");
1070 file.println(".matrix{display:grid;grid-template-columns:repeat(4,1fr);gap:9px;}");
1071 file.println(".cell{background:white;border:1px solid var(--line);border-radius:14px;padding:10px 6px;text-
align:center;min-height:86px;display:flex;flex-direction:column;align-items:center;justify-content:center
;}");
1072 file.println(".cell .dot{width:34px;height:34px;margin-bottom:8px;}");

```

```

1073 file.println(".value{display:none;font-size:22px;font-weight:900;color:#0f172a;line-height:1;margin-bottom:7
    px;});");
1074 file.println(".numeric-mode .cell .dot{display:none;});");
1075 file.println(".numeric-mode .value{display:block;});");
1076 file.println(".numeric-mode .none-bg .value{color:#ffffff;text-shadow:none;});");
1077 file.println(".numeric-mode .very-low-bg .value{color:var(--very-low);text-shadow:0 1px 1px rgba
    (15,23,42,.22);});");
1078 file.println(".numeric-mode .low-bg .value{color:var(--low);text-shadow:0 1px 1px rgba(15,23,42,.16);});");
1079 file.println(".numeric-mode .medium-bg .value{color:var(--medium);text-shadow:0 1px 1px rgba(15,23,42,.28);}
    ");");
1080 file.println(".numeric-mode .high-bg .value{color:var(--high);text-shadow:0 1px 1px rgba(15,23,42,.18);});");
1081 file.println(".numeric-mode .very-high-bg .value{color:var(--very-high);text-shadow:0 1px 1px rgba
    (15,23,42,.16);});");
1082 file.println(".label{font-size:11px;color:#475569;font-weight:700;});");
1083 file.println(".measurement{border-top:1px solid var(--line);padding-top:24px;margin-top:24px;});");
1084 file.println(".measurement:first-child{border-top:none;padding-top:0;margin-top:0;});");
1085 file.println(".measurement-title{display:flex;justify-content:space-between;gap:12px;align-items:center;
    margin-bottom:10px;});");
1086 file.println(".measurement-title h3{margin:0;font-size:19px;color:#0f172a;});");
1087 file.println(".badge{background:#ecfeff;color:#0f766e;border:1px solid #99f6e4;border-radius:999px;padding:7
    px 11px;font-size:12px;font-weight:800;});");
1088 file.println(".details{margin-top:14px;background:#ffffff;border:1px dashed #cbd5e1;border-radius:14px;
    padding:12px;});");
1089 file.println(".summary{cursor:pointer;font-weight:800;color:#334155;});");
1090 file.println(".table{width:100%;border-collapse:collapse;margin-top:12px;font-size:13px;});");
1091 file.println(".th,td{border-bottom:1px solid #e5e7eb;text-align:left;padding:8px;});");
1092 file.println(".th{color:#0f172a;background:#f8fafc;});");
1093 file.println(".tfoot{padding:20px 36px;background:#f8fafc;color:#64748b;font-size:13px;border-top:1px solid
    var(--line);});");
1094 file.println("@media(max-width:950px){.matrices-wrap{grid-template-columns:1fr}.hero h1{font-size:27px}.
    content{padding:22px}.toolbar{position:static;});");
1095 file.println("</style>");
1096
1097 file.println("</head>");
1098 file.println("<body>");
1099 file.println("<div class='page'>");
1100
1101 file.println("<div class='hero'>");
1102 file.println("<h1>");
1103 file.println(nombreReporteActual.length() > 0 ? nombreReporteActual : String("Reporte de apoyo plantar"));
1104 file.println("</h1>");
1105 file.println("<p>Fecha del reporte: ");
1106 file.println(fechaReporte());
1107 file.println("</p>");
1108 file.println("</div>");
1109
1110 file.println("<div class='content'>");
1111
1112 file.println("<div class='card'>");
1113 file.println("<h2>Foto capturada</h2>");
1114 file.println("<img class='photo' src='data:image/jpeg;base64,'");
1115
1116 bool base64OK = escribirBase64EnArchivo(file, fb->buf, fb->len);
1117
1118 file.println("< alt='Foto del usuario'>");
1119 file.println("</div>");
1120
1121 esp_camera_fb_return(fb);

```

```

1122 file.close();
1123
1124 photoInProgress = false;
1125
1126 if (!base64OK) return false;
1127
1128 String bloque = "";
1129
1130 bloque += "<div class='card'>\n";
1131 bloque += "<h2>Lectura de sensores</h2>\n";
1132 bloque += "<p>La lectura se organiza en dos matrices independientes de 10x4 y se presenta como respuesta
          relativa porcentual dentro de cada lectura.</p>\n";
1133
1134 bloque += "<div class='toolbar'>\n";
1135 bloque += "<div class='toolbar-info'><b>Visualizacion actual:</b> <span id='viewLabel'>Colores</span></div>\n";
1136 bloque += "<button class='toggle-btn' onclick='toggleView()' id='toggleButton'>Ver porcentajes</button>\n";
1137 bloque += "</div>\n";
1138
1139 bloque += "<div class='legend'>\n";
1140 bloque += "<span><i class='dot none'></i> Sin apoyo: 0 %</span>\n";
1141 bloque += "<span><i class='dot very-low'></i> Muy bajo: &gt;0 a 20 %</span>\n";
1142 bloque += "<span><i class='dot low'></i> Bajo: &gt;20 a 40 %</span>\n";
1143 bloque += "<span><i class='dot medium'></i> Medio: &gt;40 a 60 %</span>\n";
1144 bloque += "<span><i class='dot high'></i> Alto: &gt;60 a 80 %</span>\n";
1145 bloque += "<span><i class='dot very-high'></i> Muy alto: &gt;80 a 100 %</span>\n";
1146 bloque += "</div>\n";
1147 bloque += "<p><b>Escala relativa:</b> en cada lectura, el sensor con mayor respuesta se representa como 100
          % y los demas se calculan proporcionalmente.</p>\n";
1148 bloque += "<p>Los porcentajes no representan fuerza absoluta ni porcentaje del peso corporal.</p>\n";
1149
1150 bloque += "<p><b>Condicion de inicio:</b> se empieza a guardar cuando al menos un sensor supera el umbral de
          activacion.</p>\n";
1151 bloque += "<p><b>Duracion:</b> primeros 5 segundos de medicion.</p>\n";
1152 bloque += "<div id='mediciones'>\n";
1153
1154 escribirTexto(path, bloque, true);
1155
1156 return true;
1157 }
1158
1159 bool crearHTMLConFotoDesdeArchivo(String path, String fotoPath) {
1160     if (!sdOK) return false;
1161
1162     File file = SD_MMC.open(path.c_str(), FILE_WRITE);
1163
1164     if (!file) {
1165         DBG.println("ERROR: No se pudo crear el archivo HTML");
1166         return false;
1167     }
1168
1169     file.println("<!DOCTYPE html>");
1170     file.println("<html lang='es'>");
1171     file.println("<head>");
1172     file.println("<meta charset='UTF-8'>");
1173     file.println("<meta name='viewport' content='width=device-width, initial-scale=1.0'>");
1174     file.print("<title>");
1175     file.print(nombreReporteActual);

```

```

1176 file.println("</title>");
1177
1178 file.println("<style>");
1179 file.println("root{--azul:#0057b8;--azul2:#003b7a;--rosa:#d65f8f;--text:#182033;--muted:#64748b;--line:#
e2e8f0;--bg:#f5f7fb;--card:#ffffff;--very-low:#86efac;--low:#15803d;--medium:#facc15;--high:#f97316;--
very-high:#dc2626;--teal:#0f766e;});");
1180 file.println(".*{box-sizing:border-box}");
1181 file.println("body{margin:0;font-family:Arial,Helvetica,sans-serif;background:#ffffff;color:var(--text);}");
1182 file.println(".page{max-width:1320px;margin:0 auto;background:white;}");
1183 file.println(".topbar{display:flex;align-items:center;justify-content:space-between;gap:24px;padding:24px 34
px;border-bottom:1px solid var(--line);background:white;}");
1184 file.println(".brand{display:flex;align-items:center;gap:22px;}");
1185 file.println(".logo{height:84px;width:84px;object-fit:contain;background:white;border-radius:14px;}");
1186 file.println(".logo.neuro{border-radius:50%;border:1px solid #e5e7eb;padding:4px;}");
1187 file.println(".title-block{text-align:center;flex:1;}");
1188 file.println(".title-block h1{margin:0;font-size:30px;color:var(--azul2);letter-spacing:-.4px;}");
1189 file.println(".title-block p{margin:8px 0 0;color:var(--muted);font-size:14px;}");
1190 file.println(".hero{padding:28px 36px;background:linear-gradient(135deg,#ffffff 0%,#f7fbff 48%,#fff5f9
100%);border-bottom:1px solid var(--line);}");
1191 file.println(".hero-grid{display:grid;grid-template-columns:1.1fr .9fr;gap:22px;align-items:stretch;}");
1192 file.println(".hero-card{background:white;border:1px solid var(--line);border-radius:22px;padding:22px;box-
shadow:0 14px 36px rgba(15,23,42,.08);}");
1193 file.println(".hero-card h2{margin:0 0 12px;font-size:22px;color:#0f172a;}");
1194 file.println(".meta-grid{display:grid;grid-template-columns:repeat(2,minmax(0,1fr));gap:12px;margin-top:12px
;}");
1195 file.println(".meta{border:1px solid var(--line);border-radius:16px;padding:12px;background:#fbfddf;}");
1196 file.println(".meta b{display:block;font-size:12px;color:var(--muted);text-transform:uppercase;letter-
spacing:.04em;margin-bottom:5px;}");
1197 file.println(".meta span{font-size:16px;font-weight:800;color:#0f172a;}");
1198 file.println(".content{padding:30px 36px;background:#ffffff;}");
1199 file.println(".card{background:#ffffff;border:1px solid var(--line);border-radius:22px;padding:24px;margin-
bottom:24px;box-shadow:0 10px 30px rgba(15,23,42,.06);}");
1200 file.println(".card h2{margin:0 0 16px;font-size:23px;color:#0f172a;}");
1201 file.println(".photo{width:100%;max-height:560px;object-fit:contain;border-radius:20px;background:#f8f9fc;
border:1px solid #d1d5db;box-shadow:0 12px 28px rgba(15,23,42,.12);}");
1202 file.println(".toolbar{display:flex;align-items:center;justify-content:space-between;gap:14px;flex-wrap:wrap
;background:#f8f9fc;border:1px solid var(--line);border-radius:18px;padding:14px 16px;margin:18px 0;
position:sticky;top:10px;z-index:10;box-shadow:0 10px 28px rgba(15,23,42,.08);}");
1203 file.println(".toolbar-info{font-size:14px;color:var(--muted);}");
1204 file.println(".toggle-btn{border:0;border-radius:999px;background:linear-gradient(135deg,var(--azul),var(--
azul2));color:white;font-weight:800;padding:12px 18px;cursor:pointer;box-shadow:0 10px 22px rgba
(0,87,184,.22);font-size:14px;}");
1205 file.println(".legend{display:flex;gap:14px;flex-wrap:wrap;margin-top:12px;font-size:14px;}");
1206 file.println(".legend span{display:inline-flex;align-items:center;gap:8px;background:white;border:1px solid
var(--line);border-radius:999px;padding:8px 12px;}");
1207 file.println(".dot{width:24px;height:24px;border-radius:50%;display:inline-block;box-shadow:inset 0 -4px 8px
rgba(0,0,0,.18),0 5px 12px rgba(0,0,0,.13);}");
1208 file.println(".none{background:#ffffff;box-shadow:none;border:1px solid #ffffff;}");
1209 file.println(".very-low{background:var(--very-low);}.low{background:var(--low);}.medium{background:var(--
medium);}.high{background:var(--high);}.very-high{background:var(--very-high);}");
1210 file.println(".none-bg{background:#ffffff;border-color:#ffffff;box-shadow:none;}");
1211 file.println(".very-low-bg{background:#f0fdf4;border-color:#bbf7d0;}.low-bg{background:#dcfce7;border-color
:#4ade80;}.medium-bg{background:#fefce8;border-color:#fde047;}.high-bg{background:#fff7ed;border-color:#
fb923c;}.very-high-bg{background:#fef2f2;border-color:#f87171;}");
1212 file.println(".matrices-wrap{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:28px;margin-top:18px;align-items
:start;}");
1213 file.println(".matrix-panel{background:white;border:1px solid var(--line);border-radius:20px;padding:18px;}");

```

```

1214 file.println(".matrix-panel h4{margin:0 0 14px;font-size:18px;color:#0f172a;text-align:center;});
1215 file.println(".matrix{display:grid;grid-template-columns:repeat(4,1fr);gap:9px;});
1216 file.println(".cell{background:white;border:1px solid var(--line);border-radius:14px;padding:10px 6px;text-
    align:center;min-height:86px;display:flex;flex-direction:column;align-items:center;justify-content:center
    ;});
1217 file.println(".cell .dot{width:34px;height:34px;margin-bottom:8px;});
1218 file.println(".value{display:none;font-size:22px;font-weight:900;color:#0f172a;line-height:1;margin-bottom:7
    px;});
1219 file.println(".numeric-mode .cell .dot{display:none;}.numeric-mode .value{display:block;});
1220 file.println(".numeric-mode .none-bg .value{color:#ffffff;text-shadow:none;});
1221 file.println(".numeric-mode .very-low-bg .value{color:var(--very-low);text-shadow:0 1px 1px rgba
    (15,23,42,.22);});
1222 file.println(".numeric-mode .low-bg .value{color:var(--low);text-shadow:0 1px 1px rgba(15,23,42,.16);});
1223 file.println(".numeric-mode .medium-bg .value{color:var(--medium);text-shadow:0 1px 1px rgba(15,23,42,.28);}
    ");
1224 file.println(".numeric-mode .high-bg .value{color:var(--high);text-shadow:0 1px 1px rgba(15,23,42,.18);});
1225 file.println(".numeric-mode .very-high-bg .value{color:var(--very-high);text-shadow:0 1px 1px rgba
    (15,23,42,.16);});
1226 file.println(".label{font-size:11px;color:#475569;font-weight:700;});
1227 file.println(".measurement{border-top:1px solid var(--line);padding-top:24px;margin-top:24px;});
1228 file.println(".measurement:first-child{border-top:none;padding-top:0;margin-top:0;});
1229 file.println(".measurement-title{display:flex;justify-content:space-between;gap:12px;align-items:center;
    margin-bottom:10px;});
1230 file.println(".measurement-title h3{margin:0;font-size:19px;color:#0f172a;});
1231 file.println(".badge{background:#eff6ff;color:var(--azul2);border:1px solid #bfdbfef;border-radius:999px;
    padding:7px 11px;font-size:12px;font-weight:800;});
1232 file.println(".note{background:#fff7ed;border:1px solid #fed7aa;color:#7c2d12;border-radius:16px;padding:13
    px 15px;font-size:14px;line-height:1.45;margin-top:14px;});
1233 file.println(".details{margin-top:14px;background:#ffffff;border:1px dashed #cbd5e1;border-radius:14px;
    padding:12px;});
1234 file.println(".summary{cursor:pointer;font-weight:800;color:#334155;});
1235 file.println(".table{width:100%;border-collapse:collapse;margin-top:12px;font-size:13px;}th,td{border-bottom
    :1px solid #e5e7eb;text-align:left;padding:8px;}th{color:#0f172a;background:#f8f9fa;});
1236 file.println(".footer{padding:22px 36px;background:#f8f9fa;color:#64748b;font-size:13px;border-top:1px solid
    var(--line);});
1237 file.println(".summary-final{background:#f8f9fa;border:1px solid var(--line);border-radius:20px;padding:20px
    ;margin-top:24px;});
1238 file.println(".summary-final h2{margin-top:0;});
1239 file.println(".contact-card{background:#ffffff;border:1px solid var(--line);border-radius:20px;padding:20px;
    margin-top:24px;});
1240 file.println(".contact-card h2{margin:0 0 14px;color:#0f172a;});
1241 file.println(".contacts-grid{display:grid;grid-template-columns:repeat(3,minmax(0,1fr));gap:14px;});
1242 file.println(".contact-person{background:#f8f9fa;border:1px solid #e5e7eb;border-radius:16px;padding:14px;}
    ");
1243 file.println(".contact-person h3{margin:0 0 8px;font-size:15px;color:#0f172a;});
1244 file.println(".contact-person p{margin:0;color:#334155;font-size:13px;line-height:1.45;});
1245 file.println("@media(max-width:950px){.topbar,.brand{flex-direction:column}.hero-grid,.matrices-wrap,.meta-
    grid,.contacts-grid{grid-template-columns:1fr}.title-block h1{font-size:25px}.content,.hero{padding:22px
    }.toolbar{position:static}}");
1246 file.println("</style>");
1247 file.println("</head>");
1248
1249 file.println("<body>");
1250 file.println("<div class='page'>");
1251
1252 file.println("<header class='topbar'>");
1253 file.println("<div class='brand'>");
1254 file.print("<img class='logo' alt='Pontificia Universidad Javeriana Cali' src='data:image/jpeg;base64,'");

```



```

1255     escribirCadenaPROGMEM(file, LOGO_JAVERIANA_B64);
1256     file.println(">");
1257     file.println("</div>");
1258     file.println("<div class='title-block'>");
1259     file.println("<h1>Informe de apoyo plantar relativo</h1>");
1260     file.println("<p>Prototipo funcional de plataforma baropodometrica infantil</p>");
1261     file.println("</div>");
1262     file.println("<div class='brand'>");
1263     file.print("<img class='logo neuro' alt='Centro Terapeutico NeuroPrematuros' src='data:image/jpeg;base64,'");
1264     escribirCadenaPROGMEM(file, LOGO_NEUROPREMATUROS_B64);
1265     file.println(">");
1266     file.println("</div>");
1267     file.println("</header>");
1268
1269     file.println("<section class='hero'>");
1270     file.println("<div class='hero-grid'>");
1271     file.println("<div class='hero-card'>");
1272     file.print("<h2>");
1273     file.print(nombreReporteActual);
1274     file.println("</h2>");
1275     file.println("<p>Registro generado automaticamente a partir de la foto inicial y la lectura temporal de la
        cama de sensores FSR.</p>");
1276     file.println("<div class='meta-grid'>");
1277     file.println("<div class='meta'><b>Fecha del reporte</b><span>");
1278     file.print(fechaReporte());
1279     file.println("</span></div>");
1280     file.println("<div class='meta'><b>Archivo</b><span>");
1281     file.print(nombreReporteActual);
1282     file.println("</span></div>");
1283     file.println("<div class='meta'><b>Duracion programada</b><span>5 segundos</span></div>");
1284     file.println("<div class='meta'><b>Configuracion</b><span>80 sensores / 2 matrices 10x4</span></div>");
1285     file.print("<div class='meta'><b>Umbral de inicio</b><span>Cambio &gt; ");
1286     file.print(UMBRAL_DISPARO_RECEPTOR);
1287     file.println("</span></div>");
1288     file.println("</div>");
1289     file.println("</div>");
1290     file.println("<div class='hero-card'>");
1291     file.println("<h2>Uso del informe</h2>");
1292     file.println("<p>La visualizacion permite alternar entre el mapa de cinco colores y los porcentajes
        relativos de cada sensor.</p>");
1293     file.println("<div class='note'>Cada lectura se normaliza respecto al sensor de mayor respuesta, definido
        como 100 %. La escala muestra distribucion relativa del apoyo; no expresa fuerza absoluta ni porcentaje
        del peso corporal y no reemplaza la valoracion profesional.</div>");
1294     file.println("</div>");
1295     file.println("</div>");
1296     file.println("</section>");
1297
1298     file.println("<main class='content'>");
1299     file.println("<div class='card'>");
1300     file.println("<h2>Foto capturada sobre el vidrio</h2>");
1301     file.print("<img class='photo' src='data:image/jpeg;base64,'");
1302
1303     bool base64OK = escribirBase64ArchivoDesdeSD(file, fotoPath);
1304
1305     file.println("> alt='Foto capturada sobre el vidrio'>");
1306     file.println("</div>");
1307
1308     file.println("<div class='card'>");

```



```

1309 file.println("<h2>Lectura de sensores</h2>");
1310 file.println("<p>La lectura se organiza en dos matrices independientes de 10x4, conservando la ubicacion
        fisica de cada punto de apoyo dentro del prototipo.</p>");
1311 file.print("<p><b>Condicion de inicio:</b> el registro se genera solamente cuando el sistema detecta un
        apoyo suficiente en la cama de sensores. Umbral interno: cambio &gt; ");
1312 file.print(UMBRAL_DISPARO_RECEPTOR);
1313 file.println("</p>");
1314
1315 file.println("<div class='toolbar'>");
1316 file.println("<div class='toolbar-info'><b>Visualizacion actual:</b> <span id='viewLabel'>Colores</span></div>");
1317 file.println("<button class='toggle-btn' onclick='toggleView()' id='toggleButton'>Ver porcentajes</button>");
1318 file.println("</div>");
1319
1320 file.println("<div class='legend'>");
1321 file.println("<span><i class='dot none'></i> Sin apoyo: 0 %</span>");
1322 file.println("<span><i class='dot very-low'></i> Muy bajo: &gt;0 a 20 %</span>");
1323 file.println("<span><i class='dot low'></i> Bajo: &gt;20 a 40 %</span>");
1324 file.println("<span><i class='dot medium'></i> Medio: &gt;40 a 60 %</span>");
1325 file.println("<span><i class='dot high'></i> Alto: &gt;60 a 80 %</span>");
1326 file.println("<span><i class='dot very-high'></i> Muy alto: &gt;80 a 100 %</span>");
1327 file.println("</div>");
1328 file.println("<p><b>Escala relativa:</b> en cada lectura, el sensor con mayor respuesta se representa como
        100 % y los demas se calculan proporcionalmente.</p>");
1329 file.println("<p>Los porcentajes no representan fuerza absoluta ni porcentaje del peso corporal.</p>");
1330
1331 file.println("<p><b>Periodo registrado:</b> primeros 5 segundos posteriores al inicio valido de la medicion
        .</p>");
1332 file.println("<div id='mediciones'>");
1333 file.close();
1334
1335 return base64OK;
1336 }
1337
1338 bool separarPaqueteDatos(String linea, int valores[], int &disparoPaquete) {
1339     linea.trim();
1340
1341     if (!linea.startsWith("DATA,")) {
1342         return false;
1343     }
1344
1345     int inicioMax = 5;
1346     int comaMax = linea.indexOf(',', inicioMax);
1347
1348     if (comaMax < 0) {
1349         return false;
1350     }
1351
1352     disparoPaquete = linea.substring(inicioMax, comaMax).toInt();
1353
1354     String csvValores = linea.substring(comaMax + 1);
1355     return separarValores(csvValores, valores);
1356 }
1357
1358 bool crearReporteUsuarioReal() {
1359     if (reporteCreado) return true;
1360     if (!fotoTemporalOK) {

```

```
1361     DBG.println("ERROR: No existe foto temporal. No se puede crear informe.");
1362     return false;
1363 }
1364
1365 rutaHTML = construirRutaReporteUnica();
1366 nombreReporteActual = extraerNombreArchivoSinExtension(rutaHTML);
1367
1368 if (!SD_MMC.mkdir(carpetaUsuario.c_str())) {
1369     DBG.println("ERROR: No se pudo crear carpeta de usuario");
1370     return false;
1371 }
1372
1373 bool htmlOK = crearHTMLConFotoDesdeArchivo(rutaHTML, rutaFotoTemporal);
1374
1375 if (!htmlOK) {
1376     DBG.println("ERROR: No se pudo crear HTML con foto temporal");
1377     return false;
1378 }
1379
1380 prefs.putUInt("usuarioNum", usuarioActual);
1381 reporteCreado = true;
1382
1383 DBG.print("Informe real creado: ");
1384 DBG.println(nombreReporteActual);
1385 DBG.print("Archivo: ");
1386 DBG.println(rutaHTML);
1387
1388 return true;
1389 }
1390
1391 void limpiarFotoTemporal() {
1392     if (SD_MMC.exists(rutaFotoTemporal.c_str())) {
1393         SD_MMC.remove(rutaFotoTemporal.c_str());
1394     }
1395     fotoTemporalOK = false;
1396 }
1397
1398 void cancelarSesionSinReporte(const char* motivo) {
1399     if (!sesionActiva && !fotoTemporalOK) return;
1400
1401     DBG.print("Sesion cancelada sin informe: ");
1402     DBG.println(motivo);
1403
1404     enviarComandoEmisor("DESARMAR");
1405     limpiarFotoTemporal();
1406
1407     sesionActiva = false;
1408     esperandoPrimerDato = false;
1409     ventanaDatosActiva = false;
1410     reporteCreado = false;
1411     inicioVentanaDatos = 0;
1412     inicioEsperaDatos = 0;
1413     numeroMedicion = 0;
1414     ultimoDisparoRecibido = 0;
1415     muestrasGuardadas = 0;
1416     valorMaximoGlobal = 0;
1417     indiceMaximoGlobal = -1;
1418     tiempoMaximoGlobal = 0.0;
```

```
1419   carpetaUsuario = "";
1420   rutaHTML = "";
1421   nombreReporteActual = "";
1422
1423   actualizarLEDs();
1424 }
1425
1426 bool separarValores(String linea, int valores[]) {
1427     int inicio = 0;
1428
1429     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
1430         int coma = linea.indexOf(',', inicio);
1431
1432         String dato;
1433
1434         if (i < NUM_SENSORES - 1) {
1435             if (coma == -1) return false;
1436             dato = linea.substring(inicio, coma);
1437             inicio = coma + 1;
1438         } else {
1439             dato = linea.substring(inicio);
1440         }
1441
1442         valores[i] = dato.toInt();
1443
1444         if (valores[i] < 0) valores[i] = 0;
1445         if (valores[i] > VALOR_MAXIMO) valores[i] = VALOR_MAXIMO;
1446     }
1447
1448     return true;
1449 }
1450
1451 bool haySensorMayorUmbral(int valores[]) {
1452     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
1453         if (valores[i] > UMBRAL_ACTIVACION) return true;
1454     }
1455
1456     return false;
1457 }
1458
1459 String construirMatrizPanelHTML(int valores[], const char* titulo, const int matriz[FILAS_MATRIZ][
1460     COLUMNAS_MATRIZ], int maximoMedicion) {
1461     String html = "";
1462
1463     html += "<div class='matrix-panel'>\n";
1464     html += "<h4>";
1465     html += titulo;
1466     html += "</h4>\n";
1467     html += "<div class='matrix'>\n";
1468
1469     for (int fila = 0; fila < FILAS_MATRIZ; fila++) {
1470         for (int col = 0; col < COLUMNAS_MATRIZ; col++) {
1471             int indice = matriz[fila][col];
1472             html += construirCeldaHTML(valores, indice, maximoMedicion);
1473         }
1474     }
1475
1476     html += "</div>\n";
```

```

1476     html += "</div>\n";
1477
1478     return html;
1479 }
1480
1481 String construirBloqueMedicionHTML(int valores[]) {
1482     String html = "";
1483     int maximoMedicion = maximoValoresActivos(valores);
1484
1485     html += "<div class='measurement'>\n";
1486     html += "<div class='measurement-title'>\n";
1487     html += "<h3>Medicion ";
1488     html += String(numeroMedicion);
1489     html += "</h3>\n";
1490     html += "<span class='badge'>";
1491     html += String((millis() - inicioVentanaDatos) / 1000.0, 2);
1492     html += " s</span>\n";
1493     html += "</div>\n";
1494
1495     html += "<div class='matrices-wrap'>\n";
1496     html += construirMatrizPanelHTML(valores, "Matriz izquierda", matrizIzquierda, maximoMedicion);
1497     html += construirMatrizPanelHTML(valores, "Matriz derecha", matrizDerecha, maximoMedicion);
1498     html += "</div>\n";
1499
1500     html += "<details>\n";
1501     html += "<summary>Ver tabla completa de valores</summary>\n";
1502     html += "<table>\n";
1503     html += "<tr><th>Matriz</th><th>Sensor</th><th>Cambio ADC interno</th><th>Respuesta relativa</th><th>Nivel</th></tr>\n";
1504
1505     for (int i = 0; i < NUM_SENSORES; i++) {
1506         float porcentaje = calcularPorcentajeRelativo(valores[i], maximoMedicion);
1507
1508         html += "<tr><td>";
1509         html += matrizPorIndice(i);
1510         html += "</td><td>";
1511         html += nombreSensorPorIndice(i);
1512         html += "</td><td>";
1513         html += String(valores[i]);
1514         html += "</td><td>";
1515         html += String(porcentaje, 1);
1516         html += " %</td><td>";
1517         html += nombreZonaPorPorcentaje(porcentaje);
1518         html += "</td></tr>\n";
1519     }
1520
1521     html += "</table>\n";
1522     html += "</details>\n";
1523     html += "</div>\n";
1524
1525     return html;
1526 }
1527
1528 void imprimirFilaSerial(int valores[], const int matriz[FILAS_MATRIZ][COLUMNAS_MATRIZ], int fila, int
    maximoMedicion) {
1529     DBG.print("  ");
1530
1531     for (int col = 0; col < COLUMNAS_MATRIZ; col++) {

```

```
1532     int indice = matriz[fila][col];
1533     float porcentaje = calcularPorcentajeRelativo(valores[indice], maximoMedicion);
1534     DBG.print(simboloColorSerial(porcentaje));
1535
1536     if (col < COLUMNAS_MATRIZ - 1) {
1537         DBG.print(", ");
1538     }
1539 }
1540
1541 DBG.println("]");
1542 }
1543
1544 void mostrarMatrizSerial(int valores[]) {
1545     int maximoMedicion = maximoValoresActivos(valores);
1546     DBG.println();
1547     DBG.print(nombreReporteActual.length() > 0 ? nombreReporteActual : String("Reporte en curso"));
1548     DBG.print(" - Medicion ");
1549     DBG.println(numeroMedicion);
1550
1551     DBG.println("Matriz izquierda:");
1552     DBG.println("[");
1553     for (int fila = 0; fila < FILAS_MATRIZ; fila++) {
1554         imprimirFilaSerial(valores, matrizIzquierda, fila, maximoMedicion);
1555     }
1556     DBG.println("]");
1557
1558     DBG.println("Matriz derecha:");
1559     DBG.println("[");
1560     for (int fila = 0; fila < FILAS_MATRIZ; fila++) {
1561         imprimirFilaSerial(valores, matrizDerecha, fila, maximoMedicion);
1562     }
1563     DBG.println("]");
1564 }
1565
1566 bool iniciarNuevaSesionUsuario() {
1567     if (!cameraOK || !sdOK) {
1568         DBG.println("No se puede iniciar sesion: camara o microSD no disponible");
1569         return false;
1570     }
1571
1572     if (!comunicacionEmisorVigente()) {
1573         DBG.println("No se puede iniciar: la emisora aun no esta comunicada/lista.");
1574         return false;
1575     }
1576
1577     if (!capturarFotoTemporal()) {
1578         enviarComandoEmisor("DESARMAR");
1579         return false;
1580     }
1581
1582     usuarioActual = 0;
1583     carpetaUsuario = "";
1584     rutaHTML = "";
1585     nombreReporteActual = "";
1586     reporteCreado = false;
1587     sesionActiva = true;
1588     esperandoPrimerDato = true;
1589     ventanaDatosActiva = false;
```

```

1590     inicioVentanaDatos = 0;
1591     inicioEsperaDatos = millis();
1592     numeroMedicion = 0;
1593     ultimoDisparoRecibido = 0;
1594     muestrasGuardadas = 0;
1595     valorMaximoGlobal = 0;
1596     indiceMaximoGlobal = -1;
1597     tiempoMaximoGlobal = 0.0;
1598
1599     ultimoEnvioArmar = millis();
1600     enviarComandoEmisor("ARMAR");
1601
1602     DBG.println("Foto tomada. Esperando DATA con disparo calibrado > 4000 para crear informe.");
1603     actualizarLEDs();
1604
1605     return true;
1606 }
1607
1608 void finalizarSesionUsuario() {
1609     if (!sesionActiva) return;
1610
1611     if (!reporteCreado) {
1612         cancelarSesionSinReporte("termino la sesion sin datos validos con disparo calibrado > 4000");
1613         return;
1614     }
1615
1616     String cierre = "";
1617
1618     cierre += "</div>\n"; // cierre de mediciones
1619
1620     cierre += "<div class='summary-final'>\n";
1621     cierre += "<h2>Resumen tecnico del registro</h2>\n";
1622     cierre += "<table>\n";
1623     cierre += "<tr><th>Parametro</th><th>Resultado</th></tr>\n";
1624     cierre += "<tr><td>Muestras guardadas</td><td>";
1625     cierre += String(muestrasGuardadas);
1626     cierre += "</td></tr>\n";
1627     cierre += "<tr><td>Duracion programada</td><td>5 segundos</td></tr>\n";
1628     cierre += "<tr><td>Valor de activacion inicial</td><td>";
1629     cierre += String(ultimoDisparoRecibido);
1630     cierre += "</td></tr>\n";
1631     cierre += "<tr><td>Mayor cambio ADC registrado (dato tecnico interno)</td><td>";
1632     cierre += String(valorMaximoGlobal);
1633     cierre += "</td></tr>\n";
1634
1635     if (indiceMaximoGlobal >= 0) {
1636         cierre += "<tr><td>Sensor de mayor respuesta</td><td>";
1637         cierre += nombreSensorPorIndice(indiceMaximoGlobal);
1638         cierre += " / Matriz ";
1639         cierre += matrizPorIndice(indiceMaximoGlobal);
1640         cierre += "</td></tr>\n";
1641         cierre += "<tr><td>Instante aproximado del maximo</td><td>";
1642         cierre += String(tiempoMaximoGlobal, 2);
1643         cierre += " s</td></tr>\n";
1644     } else {
1645         cierre += "<tr><td>Sensor de mayor respuesta</td><td>No registrado</td></tr>\n";
1646     }
1647

```

```

1648 cierre += "<tr><td>Escala visual</td><td>0 a 100 % por lectura; el sensor de mayor respuesta equivale a 100
      %</td></tr>\n";
1649 cierre += "</table>\n";
1650 cierre += "<div class='note'>Interpretacion sugerida: revisar los porcentajes como una distribucion relativa
      del apoyo plantar durante la bipedestacion asistida. Los porcentajes permiten identificar zonas de mayor
      y menor respuesta dentro de cada lectura, pero no corresponden a fuerza absoluta ni al porcentaje del
      peso corporal. La interpretacion clinica debe realizarse por personal profesional y considerando la
      postura observada en la fotografia.</div>\n";
1651 cierre += "</div>\n";
1652
1653 cierre += "<div class='contact-card'>\n";
1654 cierre += "<h2>N\u00f3meros de contacto</h2>\n";
1655 cierre += "<div class='contacts-grid'>\n";
1656 cierre += "<div class='contact-person'><h3>Sergio Esteban Trujillo Varona</h3><p><b>Tel:</b> 3226873847<br>
      Pontificia Universidad Javeriana Cali<br>Facultad de Ingenier\u00eda y Ciencias</p></div>\n";
1657 cierre += "<div class='contact-person'><h3>Juan David Restrepo Ramirez</h3><p><b>Tel:</b> 3218850893<br>
      Pontificia Universidad Javeriana Cali<br>Facultad de Ingenier\u00eda y Ciencias</p></div>\n";
1658 cierre += "<div class='contact-person'><h3>Maria del Mar Marulanda</h3><p><b>Tel:</b> 3024325217<br>Centro
      Fisioterapeutico NeuroPrematuros<br>Fisioterapeuta Especialista en Neurorrehabilitaci\u00f3n</p></div>\n";
1659 cierre += "</div>\n";
1660 cierre += "</div>\n";
1661
1662 cierre += "</div>\n"; // cierre card sensores
1663 cierre += "</main>\n";
1664
1665 cierre += "<div class='footer'>\n";
1666 cierre += "Fin del registro: ";
1667 cierre += nombreReporteActual;
1668 cierre += ". Archivo generado automaticamente por la ESP32 receptora. ";
1669 cierre += "Fecha del reporte: ";
1670 cierre += fechaReporte();
1671 cierre += "\n</div>\n";
1672
1673 cierre += "</div>\n"; // cierre page
1674
1675 cierre += "<script>\n";
1676 cierre += "function toggleView(){\n";
1677 cierre += "    const body=document.body;\n";
1678 cierre += "    const label=document.getElementById('viewLabel');\n";
1679 cierre += "    const btn=document.getElementById('toggleButton');\n";
1680 cierre += "    body.classList.toggle('numeric-mode');\n";
1681 cierre += "    if(body.classList.contains('numeric-mode')){\n";
1682 cierre += "        label.textContent='Porcentajes relativos';\n";
1683 cierre += "        btn.textContent='Ver colores';\n";
1684 cierre += "    }else{\n";
1685 cierre += "        label.textContent='Colores';\n";
1686 cierre += "        btn.textContent='Ver porcentajes';\n";
1687 cierre += "    }\n";
1688 cierre += "}\n";
1689 cierre += "</script>\n";
1690
1691 cierre += "</body>\n";
1692 cierre += "</html>\n";
1693
1694 escribirTexto(rutaHTML, cierre, true);
1695 ultimoReporteFinalizado = rutaHTML;
1696

```

```
1697   enviarComandoEmisor("DESARMAR");
1698   limpiarFotoTemporal();
1699
1700   DBG.print("Reporte HTML finalizado: ");
1701   DBG.println(nombreReporteActual);
1702   DBG.print("Archivo: ");
1703   DBG.println(rutaHTML);
1704
1705   sesionActiva = false;
1706   esperandoPrimerDato = false;
1707   ventanaDatosActiva = false;
1708   reporteCreado = false;
1709   muestrasGuardadas = 0;
1710   valorMaximoGlobal = 0;
1711   indiceMaximoGlobal = -1;
1712   tiempoMaximoGlobal = 0.0;
1713
1714   actualizarLEDs();
1715 }
1716
1717 void procesarLineaSensores(String linea) {
1718     int valores[NUM_SENSORES];
1719     int disparoPaquete = 0;
1720
1721     if (!separarPaqueteDatos(linea, valores, disparoPaquete)) {
1722         DBG.println("Paquete ignorado: no tiene formato DATA,<disparo>,<80 valores>");
1723         return;
1724     }
1725
1726     if (!sesionActiva) return;
1727
1728     if (disparoPaquete <= UMBRAL_DISPARO_RECEPTOR) {
1729         // Doble seguridad: aunque la emisora falle, la receptora no crea informe ni guarda datos.
1730         return;
1731     }
1732
1733     if (esperandoPrimerDato) {
1734         ultimoDisparoRecibido = disparoPaquete;
1735
1736         if (!crearReporteUsuarioReal()) {
1737             cancelarSesionSinReporte("no se pudo crear el informe al recibir dato valido");
1738             return;
1739         }
1740
1741         esperandoPrimerDato = false;
1742         ventanaDatosActiva = true;
1743         inicioVentanaDatos = millis();
1744         numeroMedicion = 0;
1745
1746         DBG.print("DATA valido recibido. Disparo: ");
1747         DBG.println(disparoPaquete);
1748         DBG.println("Iniciando guardado de 5 segundos en HTML...");
1749         actualizarLEDs();
1750     }
1751
1752     if (!ventanaDatosActiva) return;
1753
1754     if (millis() - inicioVentanaDatos <= DURACION_DATOS_MS) {
```



```
1755     numeroMedicion++;
1756     actualizarResumenGlobal(valores);
1757
1758     mostrarMatrizSerial(valores);
1759
1760     String bloqueHTML = construirBloqueMedicionHTML(valores);
1761     escribirTexto(rutaHTML, bloqueHTML, true);
1762 } else {
1763     finalizarSesionUsuario();
1764 }
1765 }
1766
1767 void procesarEstadoEmisor(String linea) {
1768     linea.trim();
1769
1770     if (linea.startsWith("ESTADO,LISTO")) {
1771         // La emisora solo manda este estado despues de calibrar sensores y conectarse al AP.
1772         // Ademas se exige que haya al menos una estacion conectada al AP de la receptora.
1773         if (WiFi.softAPgetStationNum() > 0) {
1774             emisorListo = true;
1775             ultimoEstadoEmisor = millis();
1776         } else {
1777             emisorListo = false;
1778         }
1779
1780         actualizarLEDs();
1781         return;
1782     }
1783 }
1784
1785 void revisarUDP() {
1786     int packetSize = udp.parsePacket();
1787
1788     if (packetSize > 0) {
1789         char buffer[1400];
1790         int len = udp.read(buffer, sizeof(buffer) - 1);
1791
1792         if (len > 0) {
1793             buffer[len] = '\0';
1794
1795             String linea = String(buffer);
1796             linea.trim();
1797
1798             if (linea.startsWith("ESTADO,") ) {
1799                 procesarEstadoEmisor(linea);
1800                 return;
1801             }
1802
1803             procesarLineaSensores(linea);
1804
1805             udp.beginPacket(udp.remoteIP(), udp.remotePort());
1806             udp.print("OK");
1807             udp.endPacket();
1808         }
1809     }
1810 }
1811
1812
```

```

1813 String estadoTextoServidor() {
1814     String estado = "";
1815     estado += "cameraOK=" + String(cameraOK ? "1" : "0") + "\n";
1816     estado += "sdOK=" + String(sdOK ? "1" : "0") + "\n";
1817     estado += "emisorListo=" + String(comunicacionEmisorVigente() ? "1" : "0") + "\n";
1818     estado += "sesionActiva=" + String(sesionActiva ? "1" : "0") + "\n";
1819     estado += "relojConfigurado=" + String(relojConfigurado ? "1" : "0") + "\n";
1820     estado += "fecha=" + fechaReporte() + "\n";
1821     estado += "ultimoReporte=" + ultimoReporteFinalizado + "\n";
1822     return estado;
1823 }
1824
1825
1826 void agregarCadenaPROGMEM(String &destino, const char *textoProgmem) {
1827     size_t len = strlen_P(textoProgmem);
1828     destino.reserve(destino.length() + len + 1);
1829     for (size_t i = 0; i < len; i++) {
1830         destino += (char)pgm_read_byte_near(textoProgmem + i);
1831     }
1832 }
1833
1834 void manejarRaizServidor() {
1835     String pagina = "";
1836     pagina += "<!DOCTYPE html><html lang='es'><head><meta charset='UTF-8'>";
1837     pagina += "<meta name='viewport' content='width=device-width, initial-scale=1.0'>";
1838     pagina += "<title>Receptor NeuroPrematuros</title>";
1839     pagina += "<style>";
1840     pagina += "body{font-family:Arial,sans-serif;background:#f5f7fb;color:#1f2937;margin:0;padding:28px;}";
1841     pagina += ".card{max-width:860px;margin:auto;background:#fff;border-radius:18px;padding:26px;box-shadow:0 10px 30px rgba(15,23,42,.12)}";
1842     pagina += ".topbar{display:flex;align-items:center;justify-content:space-between;gap:18px;margin-bottom:18px;}";
1843     pagina += ".brand{text-align:center;flex:1}.webLogo{height:76px;width:76px;object-fit:contain;background:white;border-radius:14px}.webLogo.neuro{border-radius:50%;border:1px solid #e5e7eb;padding:4px;}";
1844     pagina += "h1{margin:0 0 6px;color:#0f3c78;font-size:26px;}h2{font-size:18px;margin-top:26px;color:#0f3c78;}";
1845     pagina += ".sub{margin:0 0 4px;color:#667085}.row{display:grid;grid-template-columns:1fr 1fr;gap:14px;margin:16px 0;}";
1846     pagina += ".box{background:#f8fafc;border:1px solid #e5e7eb;border-radius:14px;padding:14px;}";
1847     pagina += ".label{font-size:13px;color:#667085;margin-bottom:4px}.value{font-size:16px;font-weight:700;}";
1848     pagina += ".ok{color:#067647;font-weight:bold}.bad{color:#b42318;font-weight:bold}.warn{color:#b54708;font-weight:bold}";
1849     pagina += "a.btn,button.btn{display:inline-block;margin:8px 8px 0 0;padding:11px 15px;border-radius:10px;background:#0f3c78;color:white;text-decoration:none;border:0;cursor:pointer;font-weight:700;}";
1850     pagina += "button.secondary,a.secondary{background:#475467}.note{background:#ecfdf3;border:1px solid #abefc6;border-radius:12px;padding:12px;margin-top:14px;color:#05603a;}";
1851     pagina += ".steps{line-height:1.65}.small{font-size:13px;color:#667085}.footer{margin-top:20px;font-size:12px;color:#667085}";
1852     pagina += "@media(max-width:700px){.row{grid-template-columns:1fr}body{padding:14px}.card{padding:18px}.webLogo{height:58px;width:58px}.topbar{gap:10px}h1{font-size:22px}}";
1853     pagina += "</style></head><body>";
1854     pagina += "<div class='card'>";
1855     pagina += "<div class='topbar'>";
1856     pagina += "<img class='webLogo' alt='Pontificia Universidad Javeriana Cali' src='data:image/jpeg;base64,'" +
1857     agregarCadenaPROGMEM(pagina, LOGO_JAVERIANA_B64);
1858     pagina += "'>";
1859     pagina += "<div class='brand'><h1>Receptor NeuroPrematuros</h1><p class='sub'>Panel local para sincronizar fecha/hora y descargar el ultimo informe guardado en la microSD.</p></div>";

```

```

1860 pagina += "<img class='webLogo neuro' alt='Centro Terapeutico NeuroPrematuros' src='data:image/jpeg;base64,'"
      ;
1861 agregarCadenaPROGMEM(pagina, LOGO_NEUROPREMATUROS_B64);
1862 pagina += ">";
1863 pagina += "</div>";
1864
1865 pagina += "<div class='row'>";
1866 pagina += "<div class='box'><div class='label'>Camara</div><div id='camara' class='value'>";
1867 pagina += cameraOK ? "OK" : "ERROR";
1868 pagina += "</div></div>";
1869 pagina += "<div class='box'><div class='label'>MicroSD</div><div id='sd' class='value'>";
1870 pagina += sdOK ? "OK" : "ERROR";
1871 pagina += "</div></div>";
1872 pagina += "<div class='box'><div class='label'>Comunicacion con emisora</div><div id='emisor' class='value'>"
      ;
1873 pagina += comunicacionEmisorVigente() ? "OK" : "SIN CONFIRMAR";
1874 pagina += "</div></div>";
1875 pagina += "<div class='box'><div class='label'>Fecha/hora del receptor</div><div id='fecha' class='value'>";
1876 pagina += fechaReporte();
1877 pagina += "</div></div>";
1878 pagina += "</div>";
1879
1880 pagina += "<div class='note' id='syncMsg'>Al abrir esta pagina, el computador envia automaticamente su fecha
      y hora a la ESP32.</div>";
1881
1882 pagina += "<h2>Descarga del informe</h2>";
1883 pagina += "<p>Cuando termine la medicion y el LED rojo vuelva a encender, presione el boton para guardar una
      copia del informe en el computador.</p>";
1884 pagina += "<p><b>Ultimo reporte finalizado:</b><span id='ultimo'>";
1885 pagina += (ultimoReporteFinalizado.length() ? ultimoReporteFinalizado : String("Ninguno desde el ultimo
      encendido"));
1886 pagina += "</span></p>";
1887 pagina += "<a class='btn' href='/download/latest'>Descargar ultimo informe</a>";
1888 pagina += "<button class='btn secondary' onclick='sincronizarHora()'>Actualizar hora</button>";
1889
1890 pagina += "<h2>Uso recomendado</h2>";
1891 pagina += "<div class='steps'>";
1892 pagina += "1. Conecte el computador al WiFi <b>FSR_LOGGER</b>.<br>";
1893 pagina += "2. Abra esta pagina: <b>http://192.168.4.1/</b>. La fecha/hora se sincroniza sola.<br>";
1894 pagina += "3. Espere el LED rojo: indica que el sistema esta listo para tomar la foto sobre el vidrio.<br>";
1895 pagina += "4. Presione el boton fisico del prototipo para tomar la foto.<br>";
1896 pagina += "5. Cuando se encienda el LED azul, el nio puede pasar a la cama de sensores.<br>";
1897 pagina += "6. Cuando el LED azul se apague y vuelva el LED rojo, el informe ya esta cerrado y puede
      descargarse.";
1898 pagina += "</div>";
1899
1900 pagina += "<p class='footer'>La microSD sigue siendo el almacenamiento principal. Esta pagina solo permite
      descargar una copia al computador.</p>";
1901 pagina += "</div>";
1902
1903 pagina += "<script>";
1904 pagina += "async function sincronizarHora(){";
1905 pagina += "try{";
1906 pagina += "const epoch=Math.floor(Date.now()/1000);";
1907 pagina += "const tz=-(new Date().getTimezoneOffset()/60);";
1908 pagina += "const r=await fetch('/set-time?epoch='+epoch+'&tz='+tz);";
1909 pagina += "const t=await r.text();";
1910 pagina += "document.getElementById('syncMsg').textContent=r.ok?'Fecha y hora actualizadas correctamente.':'";

```

```

1911     No se pudo sincronizar fecha/hora: '+t;";
1912     pagina += "actualizarEstado()";
1913     pagina += "}catch(e){document.getElementById('syncMsg').textContent='No se pudo sincronizar fecha/hora.
1914     Revise que siga conectado al WiFi FSR_LOGGER.';}";
1915     pagina += "}";
1916     pagina += "async function actualizarEstado(){";
1917     pagina += "try{";
1918     pagina += "const r=await fetch('/status'); const t=await r.text();";
1919     pagina += "const get=(k)=>{const m=t.match(new RegExp(k+'(\\n|\\r)'));return m?m[1]:''};";
1920     pagina += "document.getElementById('camara').textContent=get('cameraOK')==='1'?OK:'ERROR';";
1921     pagina += "document.getElementById('camara').className='value '+get('cameraOK')==='1'?ok:'bad';";
1922     pagina += "document.getElementById('sd').textContent=get('sdOK')==='1'?OK:'ERROR';";
1923     pagina += "document.getElementById('sd').className='value '+get('sdOK')==='1'?ok:'bad';";
1924     pagina += "document.getElementById('emisor').textContent=get('emisorListo')==='1'?OK:'SIN CONFIRMAR';";
1925     pagina += "document.getElementById('emisor').className='value '+get('emisorListo')==='1'?ok:'warn';";
1926     pagina += "document.getElementById('fecha').textContent=get('fecha');";
1927     pagina += "document.getElementById('ultimo').textContent=get('ultimoReporte')||'Ninguno desde el ultimo
1928     encendido';";
1929     pagina += "}catch(e){console.log(e);}";
1930     pagina += "}";
1931     pagina += "window.addEventListener('load',()=>{sincronizarHora();setInterval(actualizarEstado,3000);});";
1932     pagina += "</script>";
1933     pagina += "</body></html>";
1934
1935     servidorWeb.send(200, "text/html", pagina);
1936 }
1937
1938 void manejarSetTimeServidor() {
1939     if (!servidorWeb.hasArg("epoch")) {
1940         servidorWeb.send(400, "text/plain", "Falta parametro epoch");
1941         return;
1942     }
1943
1944     uint32_t epochRecibido = (uint32_t)strtoul(servidorWeb.arg("epoch").c_str(), NULL, 10);
1945
1946     if (epochRecibido < 1700000000UL) {
1947         servidorWeb.send(400, "text/plain", "Epoch invalido");
1948         return;
1949     }
1950
1951     if (servidorWeb.hasArg("tz")) {
1952         int tz = servidorWeb.arg("tz").toInt();
1953         if (tz >= -12 && tz <= 14) zonaHorariaHoras = tz;
1954     }
1955
1956     epochBaseUTC = epochRecibido;
1957     millisBaseReloj = millis();
1958     relojConfigurado = true;
1959
1960     servidorWeb.send(200, "text/plain", String("OK\\n") + fechaReporte());
1961 }
1962
1963 void manejarStatusServidor() {
1964     servidorWeb.send(200, "text/plain", estadoTextoServidor());
1965 }
1966
1967 void manejarLatestServidor() {
1968     servidorWeb.send(200, "text/plain", ultimoReporteFinalizado);
1969 }

```

```

1966 }
1967
1968 void manejarDownloadLatestServidor() {
1969     if (ultimoReporteFinalizado.length() == 0) {
1970         servidorWeb.send(404, "text/plain", "No hay reporte finalizado desde el ultimo encendido");
1971         return;
1972     }
1973
1974     if (!SD_MMC.exists(ultimoReporteFinalizado.c_str())) {
1975         servidorWeb.send(404, "text/plain", "El archivo ya no existe en la microSD");
1976         return;
1977     }
1978
1979     File archivo = SD_MMC.open(ultimoReporteFinalizado.c_str(), FILE_READ);
1980
1981     if (!archivo) {
1982         servidorWeb.send(500, "text/plain", "No se pudo abrir el reporte");
1983         return;
1984     }
1985
1986     String nombreDescarga = extraerNombreArchivoSinExtension(ultimoReporteFinalizado);
1987     if (nombreDescarga.length() == 0) nombreDescarga = "Reporte_NeuroPrematuros";
1988
1989     servidorWeb.sendHeader("Content-Disposition", String("attachment; filename=\"" + nombreDescarga + String(".html\""));
1990     servidorWeb.streamFile(archivo, "text/html");
1991     archivo.close();
1992 }
1993
1994 void iniciarServidorWeb() {
1995     servidorWeb.on("/", manejarRaizServidor);
1996     servidorWeb.on("/set-time", manejarSetTimeServidor);
1997     servidorWeb.on("/status", manejarStatusServidor);
1998     servidorWeb.on("/latest", manejarLatestServidor);
1999     servidorWeb.on("/download/latest", manejarDownloadLatestServidor);
2000     servidorWeb.begin();
2001     DBG.println("Servidor web activo en http://192.168.4.1/");
2002 }
2003
2004 void atenderServidorWeb() {
2005     servidorWeb.handleClient();
2006 }
2007
2008 void setup() {
2009     WRITE_PERI_REG(RTC_CNTL_BROWN_OUT_REG, 0);
2010
2011     // Apagar indicadores lo antes posible. GPIO1/TXD puede quedar alto durante el arranque
2012     // por comportamiento propio del puerto serial; desde este punto queda en alta impedancia.
2013     inicializarLEDs();
2014
2015     DBG.begin(115200);
2016     delay(1500);
2017
2018     DBG.println();
2019     DBG.println("=====");
2020     DBG.println("SunFounder: camara + boton + microSD + WiFi + HTML + descarga web local");
2021     DBG.println("Receptora 80 sensores - matrices 10x4 actualizadas");
2022     DBG.println("=====");

```

```
2023
2024 pinMode(BUTTON_PIN, INPUT_PULLUP);
2025
2026 prefs.begin("sistema", false);
2027
2028 DBG.println("Iniciando camara...");
2029 cameraOK = initCamera();
2030
2031 if (!cameraOK) {
2032     DBG.println("Fallo la inicializacion funcional de la camara");
2033 }
2034
2035 sdOK = initSD();
2036
2037 if (!sdOK) {
2038     DBG.println("Fallo la inicializacion de la microSD");
2039 }
2040
2041 initWiFiAP();
2042 iniciarServidorWeb();
2043
2044 enviarComandoEmisor("DESARMAR");
2045
2046 if (cameraOK && sdOK) {
2047     DBG.println("Sistema listo");
2048     DBG.println("Presiona el boton externo conectado entre RXD y GND");
2049     DBG.println("LED1 verde/listo activo en LOW. LED2 naranja/sensores activo en HIGH sobre GPIO1/TXD.");
2050 } else {
2051     DBG.println("Sistema iniciado con errores");
2052 }
2053 }
2054
2055 void loop() {
2056     atenderServidorWeb();
2057
2058     if (WiFi.softAPgetStationNum() <= 0) {
2059         emisorListo = false;
2060     }
2061
2062     if (emisorListo && !comunicacionEmisorVigente()) {
2063         emisorListo = false;
2064     }
2065
2066     actualizarLEDs();
2067
2068     revisarUDP();
2069
2070     mantenerEmisorArmado();
2071
2072     if (sesionActiva && esperandoPrimerDato && !ventanaDatosActiva) {
2073         if (millis() - inicioEsperaDatos > TIEMPO_MAX_ESPERA_DATOS_MS) {
2074             cancelarSesionSinReporte("no llego ningun sensor con disparo calibrado > 4000 dentro del tiempo de
espera");
2075         }
2076     }
2077
2078     if (ventanaDatosActiva && millis() - inicioVentanaDatos > DURACION_DATOS_MS) {
2079         finalizarSesionUsuario();
2080     }
2081 }
```

```
2080 }
2081
2082 actualizarLEDs();
2083
2084 bool reading = digitalRead(BUTTON_PIN);
2085
2086 if (reading != lastReading) {
2087     lastDebounceTime = millis();
2088     lastReading = reading;
2089 }
2090
2091 if ((millis() - lastDebounceTime) > debounceDelay) {
2092     if (reading != stableButtonState) {
2093         stableButtonState = reading;
2094
2095         if (stableButtonState == LOW && !photoInProgress && !sesionActiva) {
2096             DBG.println("Boton externo detectado");
2097             iniciarNuevaSesionUsuario();
2098         }
2099
2100         if (stableButtonState == LOW && sesionActiva) {
2101             DBG.println("Ya hay una sesion activa. Espera a que termine.");
2102         }
2103
2104         if (stableButtonState == HIGH) {
2105             DBG.println("Boton liberado");
2106         }
2107     }
2108 }
2109 }
```

Código 9.2: Código principal del ESP32 receptor.

4. Manual de Usuario

El presente anexo contiene el manual de usuario del prototipo de plataforma baropodométrica infantil, en el cual se describen las condiciones generales de uso, advertencias de seguridad, identificación de partes, especificaciones básicas, procedimiento de operación, visualización y descarga del informe, dimensiones principales, mantenimiento, limpieza y datos de soporte.

1. Manual de usuario

Plataforma baropodométrica infantil

Prototipo funcional para registro de apoyo plantar relativo durante bipedestación asistida



Versión:
1.0



Desarrollado por:
Sergio Esteban Trujillo Varona
Juan David Restrepo Ramírez
Facultad de Ingeniería y Ciencias



En colaboración con:
Centro Fisioterapéutico
NeuroPrematuros



2. Descripción del producto

Información general sobre el propósito y las funciones del sistema.



1 ¿Qué es el dispositivo?

La plataforma baropodométrica infantil es un prototipo funcional diseñado para registrar, visualizar y almacenar información relativa del apoyo plantar durante bipedestación asistida en población infantil.



2 ¿Para qué sirve?

Este sistema permite:

- Capturar una fotografía inicial del apoyo sobre la superficie superior de vidrio.
- Registrar durante 5 segundos la información relativa del apoyo plantar en una cama de sensores.
- Generar un informe en formato HTML para visualización en computador.



3 Funciones principales

- Toma de fotografía inicial.
- Captura de información de 80 sensores FSR.
- Almacenamiento de resultados en microSD.
- Visualización del informe en computador.
- Descarga del informe desde navegador web.



4 Nota importante



Este prototipo no reemplaza la valoración profesional y su información debe interpretarse como apoyo para la revisión del patrón relativo de apoyo plantar.



3. Advertencias de seguridad

Recomendaciones básicas para un uso seguro del dispositivo.



1 Riesgos eléctricos

Utilice el dispositivo únicamente con la alimentación prevista para el sistema.

No manipule conexiones internas mientras el equipo esté energizado.

No utilice el sistema si observa cables sueltos, deteriorados o expuestos.



2 Condiciones de uso

Uso en interiores.

Utilizar sobre una superficie estable y nivelada.

Mantener alejado de agua, humedad excesiva o salpicaduras.

Evitar exposición directa al sol o a fuentes intensas de calor.

Operar bajo supervisión del profesional responsable.



3 Qué no debe hacer el usuario

No abrir el sistema ni retirar tapas durante su funcionamiento.

No exceder la carga máxima de uso segura.

No golpear la superficie de vidrio.

No limpiar con líquidos abundantes o productos abrasivos.

No retirar la microSD mientras se esté realizando una medición.

No usar el sistema sin la memoria microSD insertada, por el contrario no va a funcionar.



4 Manipulación

El niño debe estar siempre acompañado por la fisioterapeuta y un adulto responsable durante la medición.

El paso del vidrio a la cama de sensores debe realizarse de forma asistida.



Lea y siga estas advertencias antes de cada medición para proteger al usuario y conservar el correcto funcionamiento del sistema.

4. Contenido del sistema e identificación de partes

Elementos incluidos y ubicación general de los componentes del dispositivo.



Las funciones de los componentes se describen en las secciones correspondientes de este manual.

5. Identificación de partes

- 1 Superficie superior de vidrio
- 2 Espejo
- 3 Botón de captura
- 4 LED rojo - listo para toma de fotografía
- 5 LED azul - etapa de medición en cama de sensores
- 6 Cajón inferior / cama de sensores
- 7 Zona interna de electrónica
- 8 Puerto / acceso de alimentación
- 9 Memoria microSD

6. Especificaciones básicas

Características generales de funcionamiento, alimentación y operación del prototipo.

Parámetro	Especificación
Tipo de dispositivo	Prototipo funcional de plataforma baropodométrica infantil
Función principal	Registro y visualización de apoyo plantar relativo
Tipo de sensado	80 sensores FSR
Distribución de sensores	2 matrices de 10 × 4
Tiempo de medición	5 segundos
Captura de imagen	Sí
Almacenamiento	Memoria microSD
Visualización	Informe HTML
Comunicación interna	WiFi local entre ESP32
Alimentación de entrada	120 V AC
Alimentación interna de control	5 V DC
Tipo de alimentación	Red eléctrica con conversión interna a DC
Carga máxima de uso segura recomendada	50 kg
Uso	Interior, supervisado



El equipo debe utilizarse en interiores, sobre una superficie estable y bajo supervisión del profesional responsable.

7. Instalación

Características generales de funcionamiento, alimentación y operación del prototipo.

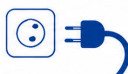
1. Antes de encender



Verifique que el podoscopio esté sobre una superficie firme y nivelada.



Verifique que la microSD esté correctamente instalada.



Verifique que el sistema de alimentación esté conectado correctamente.



Asegúrese de que el área esté libre de obstáculos.

2. Cómo conectar el dispositivo

1



Ubique el equipo en el lugar de uso.

2



Conecte la alimentación al sistema.

3



Encienda el equipo.

4



Espere a que el sistema complete su preparación.

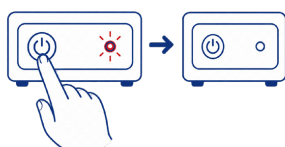
3. Requisito previo de operación



El sistema estará listo cuando el **LED rojo** se encienda, indicando que ya puede iniciarse una nueva medición.

8. Instrucciones de uso - paso a paso

Secuencia recomendada para realizar una medición completa del apoyo plantar.



Paso 1. Encender el sistema

Conecte y energice el equipo.

Indicador esperado:

Espere a que se encienda el LED rojo.

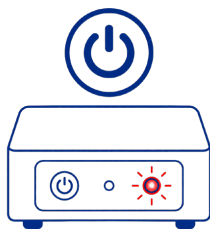
Significado:

El sistema está listo para que el niño se pare sobre el vidrio y se tome la fotografía inicial.



Paso 2. Ubicar al niño sobre el vidrio

Con ayuda de la fisioterapeuta, ubique al niño sobre la superficie superior de vidrio.



Paso 3. Presionar el botón

Presione el botón del sistema para tomar la fotografía inicial.

Indicador esperado:

Después de presionar el botón, el LED rojo se apaga.

8. Instrucciones de uso - paso a paso

Continuación del procedimiento de medición.



Paso 4. Esperar cambio a etapa de medición

Tras la captura de la fotografía, se encenderá el LED azul.

Significado:

El niño ya puede pasar a la cama de sensores para iniciar la medición cuando se desee.

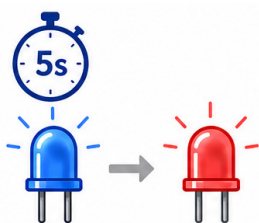


Paso 5. Ubicar al niño en la cama de sensores

Con ayuda de la fisioterapeuta, ubique al niño sobre la cama de sensores en el cajón inferior.

Indicador esperado:

El LED azul permanece encendido durante la etapa de medición.



Paso 6. Esperar finalización de la medición

La medición se realiza durante 5 segundos.

- El LED azul se apaga
- Vuelve a encenderse el LED rojo

Significado:

La medición finalizó correctamente y el sistema está listo para una nueva medición.



Recordatorio: una nueva medición puede iniciarse cuando el LED rojo vuelva a encenderse.

9. Visualización y descarga del informe

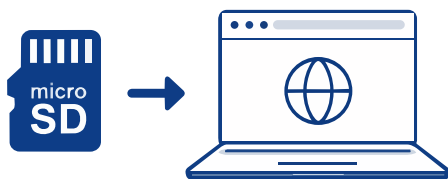
Opciones disponibles para consultar, abrir o descargar el informe generado por el sistema.

Opción A. Descargar el informe desde el computador



- 1 Conecte el computador a la red Wifi del sistema: **FSR_LOGGER**, con la contraseña **12345678**.
- 2 Abra el navegador web.
- 3 Ingrese la dirección en el navegador: **<http://192.168.4.1/>**
- 4 Espere a que termine la medición.
- 5 Cuando el LED azul se apague y el LED rojo vuelva a encenderse, presione:
"Descargar último informe"
- 6 El archivo HTML se descargará al computador.

Opción B. Visualizar el informe desde la memoria microSD



- 1 Apague el sistema.
- 2 Retire la memoria microSD.
- 3 Inserte la memoria en un computador.
- 4 Busque el archivo HTML correspondiente al registro realizado.
- 5 Ábralo con un navegador web.

¿Qué contiene el informe?



- Fecha y hora del registro
- Imagen capturada
- Visualización de las matrices izquierda y derecha
- Mapa por colores
- Valores numéricos por sensor
- Resumen de datos del registro

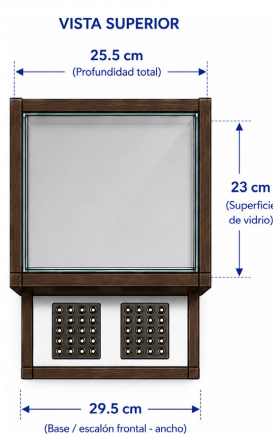
10. Dimensiones reales del podoscopio

Dimensiones principales y medidas generales del prototipo funcional



Dimensiones principales del prototipo

Parámetro	Valor
Alto total	41.3 cm
Ancho total	33 cm
Profundidad total	25.5 cm
Superficie de vidrio	23 cm x 29 cm
Espesor del vidrio	10 mm
Altura de abertura frontal	30 cm
Base / escalón frontal	24 cm x 29.5 cm x 5 cm
Carga máxima de uso segura recomendada	50 kg



Las dimensiones presentadas corresponden al prototipo funcional desarrollado para uso interior y supervisado.

11. Mantenimiento y limpieza

Recomendaciones de cuidado del equipo y guía básica de solución de problemas.

 Limpieza • Limpiar la superficie de vidrio con un paño suave ligeramente humedecido. • Limpiar la estructura externa con paño seco o ligeramente húmedo. • No usar solventes, alcohol en exceso, cloro ni limpiadores abrasivos. • No permitir ingreso de líquidos a la parte interna del sistema.	 Cuidados • No apoyar objetos pesados diferentes al uso previsto. • No golpear el vidrio ni el cajón inferior. • No manipular la electrónica interna. • Revisar periódicamente el estado del cableado y de la alimentación	 Mantenimiento • Verificación periódica de funcionamiento del sistema. • Revisión del estado de microSD. • Revisión del encendido de indicadores LED. • Revisión de la respuesta general del sistema antes del uso.
--	---	--

12. Solución de problemas

Problema	Posible causa	Solución
El sistema no enciende	Sin alimentación	Verificar conexión de energía
El LED rojo no enciende	El sistema aún no está listo o no hay comunicación interna	Esperar inicialización y verificar encendido completo
El LED azul no se enciende después de la foto	No se ha iniciado correctamente la siguiente etapa	Apagar para reinicio del sistema y volver a tomar la medición
No se genera informe	No se completó la medición	Repetir el procedimiento completo
No se puede descargar el informe	El computador no está conectado al WiFi del sistema	Conectarse a la red FSR_LOGGER
El navegador no abre la página	Dirección incorrecta o falta de conexión	Ingresa a http://192.168.4.1/
La imagen no aparece en el informe	Fallo puntual en captura	Repetir la medición
No se puede leer la microSD	Memoria mal insertada o con error	Apagar el equipo, reinstalar y volver a intentar

13. Garantía y soporte

Información general sobre el carácter académico del prototipo y canales de contacto para soporte.



Este dispositivo corresponde a un prototipo funcional académico.

Su uso debe realizarse bajo supervisión y dentro de las condiciones previstas de operación.

Para soporte o información relacionada con el sistema, puede comunicarse con:



Sergio Esteban Trujillo Varona



Tel: 3226873847



Pontificia Universidad Javeriana Cali



Facultad de Ingeniería y Ciencias



Juan David Restrepo Ramírez



Tel: 3218850893



Pontificia Universidad Javeriana Cali



Facultad de Ingeniería y Ciencias



María del Mar Marulanda



Tel: 3024325217



Centro Fisioterapéutico NeuroPrematuros



Fisioterapeuta Especialista en Neurorehabilitación

Conexión Wi-Fi local y descarga del informe

Para acceder a la interfaz local del prototipo, el computador o teléfono celular debe conectarse a la red Wi-Fi generada por el sistema. Los datos de conexión son:

- Nombre de la red: FSR_LOGGER
- Contraseña: 12345678
- Dirección de acceso: <http://192.168.4.1/>

5. Evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción e integración

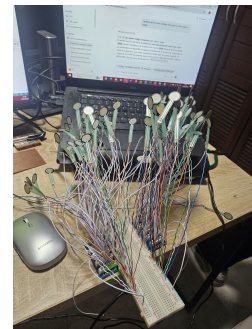
Este anexo presenta evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción, montaje e integración física del prototipo. Las imágenes documentan etapas del desarrollo mecánico, la conexión preliminar de sensores, la organización del cableado, la integración de la cama de sensores, la incorporación de la PCB de adquisición, la verificación preliminar de alimentación e iluminación, las modificaciones físicas realizadas al sistema y el montaje del módulo receptor con cámara y memoria microSD. Estas evidencias sirven como soporte visual del proceso constructivo descrito en los capítulos de diseño, implementación y pruebas.



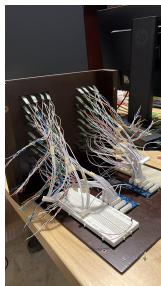
(a) Construcción y adecuación mecánica inicial.



(b) Integración física con vidrio, cajón y alimentación.



(c) Conexión preliminar y verificación inicial de sensores FSR.



(d) Integración del cableado de sensores hacia la PCB.



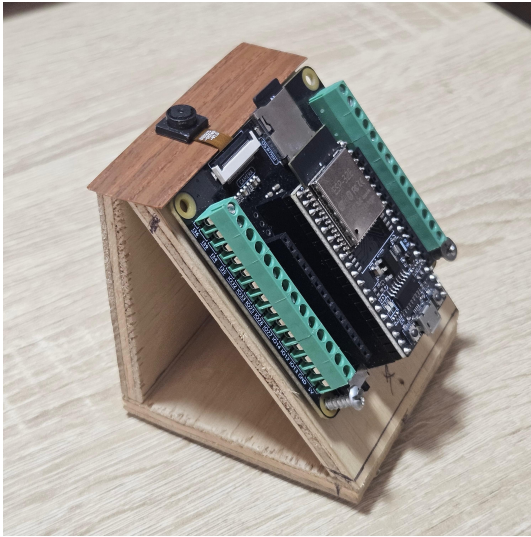
(e) Verificación preliminar de alimentación e iluminación.



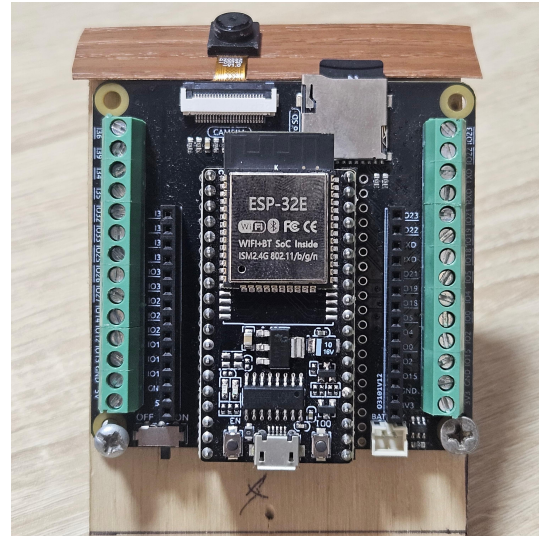
(f) Última modificación física realizada al prototipo.

Figura 9.4: Evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción, conexión preliminar, integración y modificación final del prototipo.

5. Evidencia fotográfica complementaria del proceso de construcción e integración165



(a) Montaje del módulo receptor con cámara sobre soporte interno del prototipo.



(b) Vista frontal del módulo ESP32 receptor, cámara y ranura microSD.

Figura 9.5: Evidencia complementaria del montaje del módulo receptor encargado de la captura fotográfica, almacenamiento local y generación del informe.

6. Evidencias audiovisuales complementarias de verificación

Este anexo reúne los enlaces a las evidencias audiovisuales complementarias generadas durante la verificación funcional del prototipo. Los videos documentan pruebas de alimentación, revisión externa del sistema, respuesta de sensores, operación integrada, comprobación del funcionamiento dentro del flujo terapéutico y acceso a la interfaz local del sistema desde dispositivos conectados a la red Wi-Fi del prototipo. Estas evidencias no reemplazan la descripción técnica presentada en el cuerpo del documento, sino que sirven como soporte visual del proceso de verificación.

Evidencia	Descripción	Enlace
Prueba de alimentación	Video de encendido y apagado del prototipo, utilizado para evidenciar la operación básica del sistema de alimentación y el comportamiento inicial de los indicadores.	Ver video
Prueba de aislamiento externo	Video de revisión externa del sistema, orientado a evidenciar que los elementos de alimentación y conexiones visibles permanecen protegidos durante la operación supervisada.	Ver video
Prueba de sensores	Video de activación de sensores FSR, utilizado para evidenciar la respuesta de los puntos de sensado ante la aplicación de carga sobre la cama de sensores.	Ver video
Pruebas funcionales del sistema	Videos de operación integrada del prototipo, incluyendo captura fotográfica, medición sobre sensores, almacenamiento y generación del informe de sesión.	Ver carpeta
Prueba de acceso desde teléfono celular	Video de verificación del acceso a la interfaz local del prototipo desde un teléfono celular conectado a la red Wi-Fi del sistema, evidenciando la consulta del entorno de descarga del informe sin requerir conexión a Internet.	Ver video
Comprobación del funcionamiento en flujo terapéutico	Carpeta con evidencia audiovisual de la comprobación del funcionamiento del prototipo dentro del flujo terapéutico, incluyendo la interacción con el usuario, la operación supervisada y la integración del sistema al contexto de uso previsto.	Ver carpeta

Nota: los enlaces corresponden a archivos almacenados en una carpeta digital de acceso controlado. Para su consulta, los permisos de visualización deben estar habilitados para usuarios con el enlace.

7. Esquemáticos complementarios ampliados de alimentación e indicadores

Este anexo presenta versiones ampliadas de los esquemáticos asociados a la alimentación eléctrica general del prototipo y a la conexión de los LEDs indicadores y el botón de captura del ESP32 receptor. Las figuras se incluyen en formato ampliado para facilitar la revisión de detalles técnicos que, por limitaciones de espacio, pueden observarse con menor resolución en el cuerpo principal del documento.

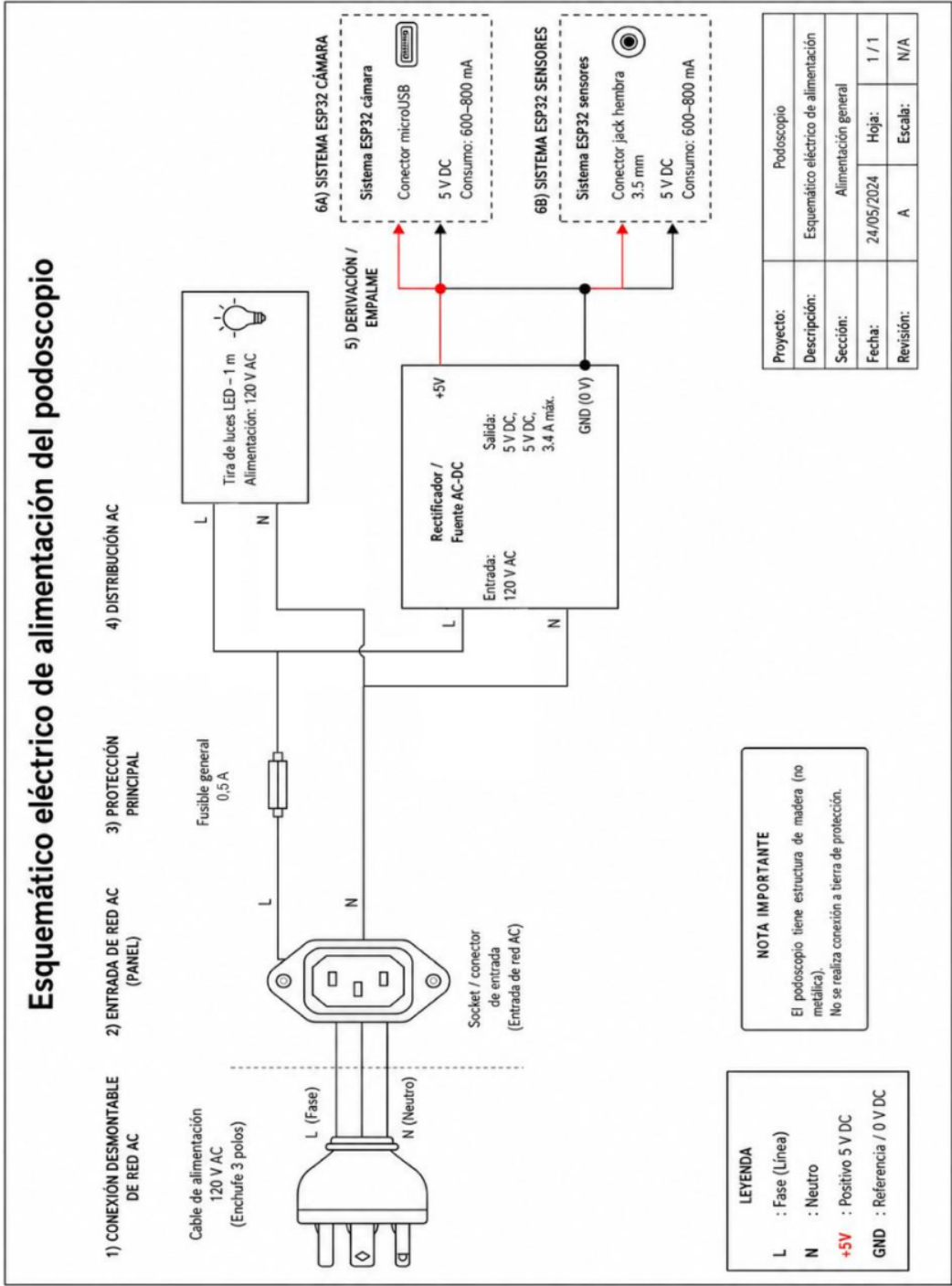


Figura 9.6: Versión ampliada del esquemático eléctrico de alimentación general del podoscopio.

Conexión de LEDs indicadores y botón de captura (ESP32 cámara)

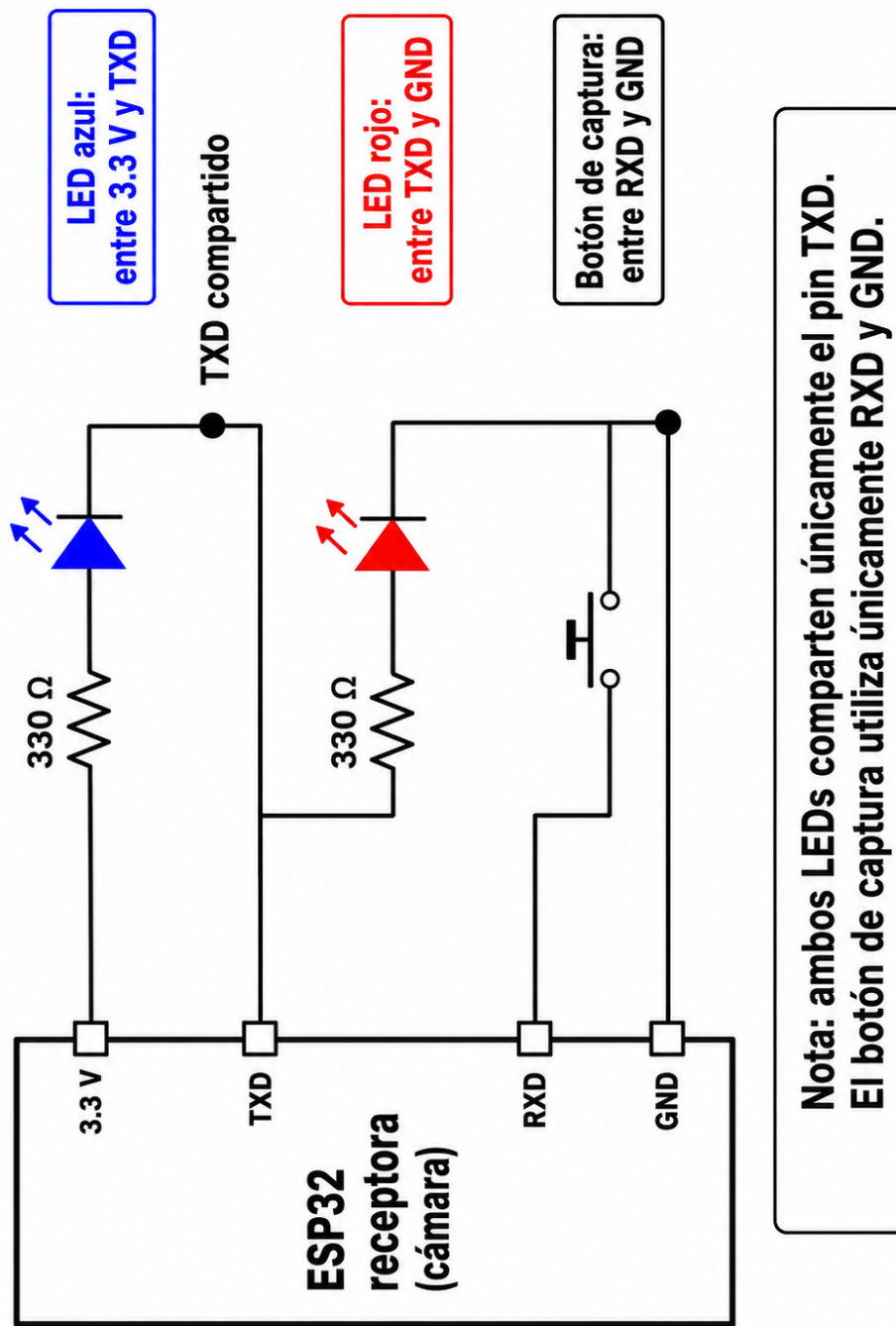


Figura 9.7: Versión ampliada del esquemático de conexión de LEDs indicadores y botón de captura del ESP32 receptor.

8. Consentimiento informado para participación en pruebas

Este anexo presenta el consentimiento informado firmado para la participación en pruebas de campo relacionadas con la verificación funcional del prototipo. El documento evidencia la autorización para realizar actividades guiadas durante la evaluación del sistema, bajo supervisión y con fines académicos asociados al desarrollo del trabajo de grado.



CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA LA PARTICIPACIÓN EN PRUEBAS DE CAMPO

Tesis NeuroPrematuros

Desarrollo y validación de un prototipo como trabajo de grado de Ingeniería Electrónica

Investigadores

Sergio Esteban Trujillo Varona

Correo: sergiotrujillo07@javerianacali.edu.co

Juan David Restrepo Ramírez

Correo: juandavidrestrepo01@javerianacali.edu.co

Director del trabajo de grado:

Alexander Martínez Álvarez

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Consentimiento

Estimado(a) padre, madre o acudiente:

Lo invitamos cordialmente a autorizar la participación de su hijo(a) en unas pruebas de campo relacionadas con el desarrollo de un prototipo, el cual hace parte del trabajo de grado de los estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

El objetivo de estas pruebas es evaluar el funcionamiento, desempeño y usabilidad del prototipo en un entorno controlado. La participación consiste únicamente en la realización de actividades guiadas por los investigadores, bajo supervisión permanente.

La participación de su hijo(a) es completamente voluntaria. Usted podrá retirar su autorización en cualquier momento, sin que esto genere consecuencia alguna.

Las pruebas no representan riesgos mayores a los presentes en actividades cotidianas. En todo momento los investigadores velarán por la seguridad, bienestar, dignidad e integridad de los participantes.

La información obtenida durante las pruebas será utilizada únicamente con fines académicos y de investigación, como parte del trabajo de grado. Los datos serán tratados de manera confidencial y no se divulgará información que permita identificar a los participantes.

En caso de requerirse el registro fotográfico, de video o audio durante las pruebas, este será utilizado únicamente con fines académicos relacionados con el desarrollo y sustentación del proyecto de grado.

Al firmar este documento, manifiesto que:

- He leído y comprendido la información presentada.
- He tenido la oportunidad de realizar preguntas y estas fueron respondidas satisfactoriamente.



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

- Comprendo que la participación es voluntaria y que puedo retirar mi consentimiento en cualquier momento.
- Autorizo la participación de mi hijo(a) en las pruebas de campo del proyecto de investigación descrito anteriormente.

Datos del padre, madre o acudiente

Nombre completo:

Laura Bowman

brothian Giron

Firma:

Fecha:

09/07/2026

9. Informe HTML completo generado por el prototipo

Este anexo presenta el enlace de descarga al informe HTML completo generado por el prototipo al finalizar una sesión funcional de registro. El archivo integra la fotografía de referencia de la huella plantar, la información general de la sesión, las matrices izquierda y derecha de sensores FSR, los porcentajes de apoyo relativo y la visualización por rangos de color.

[Descargar informe HTML generado por el prototipo](#)

Nota: Google Drive puede mostrar el archivo HTML como código fuente en la vista previa. Para visualizar correctamente el informe, se debe descargar el archivo y abrirlo localmente desde un navegador web, como Google Chrome, Microsoft Edge o Mozilla Firefox.

Bibliografía

- [1] C. J. De La Cruz Quispe and J. E. Puma Chombo, “Efecto de un programa de neurorrehabilitación pediátrica en las actividades motoras gruesas de bebés prematuros,” *Vive Revista de Investigación en Salud*, vol. 7, no. 21, pp. 934–945, Sep. 2024, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://revistavive.org/index.php/revistavive/article/view/534>
- [2] S. Pérez-de la Cruz, “Parálisis cerebral infantil y el uso de sistemas de posicionamiento para el control postural: estado actual del arte,” *Neurología*, vol. 32, no. 9, pp. 610–615, nov.–dic. 2017, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213485315001516>
- [3] J. Goodwin, J. Lecouturier, A. Basu *et al.*, *Standing Frames for Children with Cerebral Palsy: A Mixed-Methods Feasibility Study*, ser. Health Technology Assessment. Southampton, UK: NIHR Journals Library, Sep. 2018, vol. 22, no. 50, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK525747/>
- [4] C. A. Díaz, A. Torres, J. I. Ramírez, L. F. García, and N. Álvarez, “Descripción de un sistema para la medición de las presiones plantares por medio del procesamiento de imágenes: Fase I,” *Revista EIA*, no. 6, pp. 43–55, 2006, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200005
- [5] XSENSOR Technology Corporation, “Investigación sobre la marcha y el movimiento,” Sitio web de XSENSOR Technology Corporation, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://es.xsensor.com/solutions-and-platform/human-performance/gait-motion-insoles>
- [6] BIOMECH LIMITADA, “Sistema de manufactura de plantillas personalizadas,” Sitio web de BIOMECH LIMITADA, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.biomech.com.co/sistema-de-fabricacion-plantillas.html>
- [7] F. Launay, “Malposiciones y malformaciones congénitas del pie infantil,” *EMC - Aparato Locomotor*, vol. 46, no. 3, pp. 1–10, Sep. 2013, accedido: 10 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1286935X13654969>
- [8] S. Marco Colás, “Optimización de sensores de presión piezorresistivos de silicio para instrumentación biomédica y aplicaciones a alta temperatura,” Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona, España, Jul. 1993, accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/2445/34951>
- [9] E. J. Urendes Jiménez, “Sistema robótico ambulatorio de rehabilitación de marcha. solución integrada de inducción de movimientos y descarga parcial de peso del paciente,” Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, Mar. 2018, accedido: 13 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstreams/1ee976-785d-4c00-a67c-19e8db958fd8/download>

- [10] F. E. Narciso and T. J. Rodríguez, “Un modelo para diseñar la interacción humano-computadora (MODIHC),” in *XXVII Conferencia Latinoamericana de Informática (CLEI’2001)*, Mérida, Venezuela, Sep. 2001, accedido: 13 de junio de 2026. [Online]. Available: https://clei.org/proceedings_data/CLEI2001/CLEI%20XXVII_Por%20Capitulo_OCR/CLEI%20XXVI_105_OCR.pdf
- [11] A. M. Bolaños Roldán, “Calidad de vida relacionada con la salud en niños con parálisis cerebral de la ciudad de Cali, Colombia, 2016,” Universidad del Valle, Facultad de Salud, Escuela de Rehabilitación Humana, Cali, Colombia, Informe técnico final de proyecto de investigación 1807, Aug. 2017, accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstreams/eb63b421-faca-4c85-b9bc-64c21ee2af26/download>
- [12] *IEEE Taxonomy*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025, versión 1.05. Accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://ieee-org.widen.net/s/jwk9pcxxvd/ieee-taxonomy>
- [13] IEEE Computer Society, “IEEE Computer Society,” Sitio web institucional, accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.computer.org/>
- [14] A. Serna Ruiz, F. A. Ros García, and J. C. Rico Noguera, *Guía práctica de sensores*. Las Rozas, Madrid, España: Creaciones Copyright, S.L., 2010, accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.creacionescopyright.com/libros/gu%C3%ADa-pr%C3%A1ctica-de-sensores-detail>
- [15] M. C. Ruiz Cardona, “Proyecto UP: bipedestadores para bebés prematuros ganó premio a la innovación universitaria 2023 de CIDESCO,” Pontificia Universidad Javeriana Cali, Oct. 2023, publicado el 3 de octubre de 2023. Accedido: 8 de noviembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.javerianacali.edu.co/noticias/proyecto-bipedestadores-para-bebes-prematuros-gano-premio-la-innovacion-universitaria-2023>
- [16] Pontificia Universidad Javeriana Cali, “Diplomado seguimiento al bebé prematuro y de alto riesgo en convenio con Casa Madre Canguro Alfa: modalidad virtual,” Documento institucional, Jan. 2022, accedido: 8 de noviembre de 2025. [Online]. Available: https://www.javerianacali.edu.co/sites/default/files/2022-01/SEGUIMIENTO_BEBE_PREMATURO_2022.pdf
- [17] Pesquisa Javeriana, “Ciencia al servicio de los bebés que nacen demasiado pronto,” Pontificia Universidad Javeriana, Jun. 2014, publicado el 15 de junio de 2014. Accedido: 8 de noviembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/ciencia-al-servicio-de-los-bebes-que-nacen-demasiado-pronto/>
- [18] Pontificia Universidad Javeriana, “Innovación tecnológica para tratar el pie diabético obtuvo premio de la ANDI,” Hoy en la Javeriana, Jun. 2024, publicado el 13 de junio de 2024. Accedido: 8 de noviembre de 2025. [Online]. Available: <https://www.javeriana.edu.co/hoy-en-la-javeriana/w/hoy-en-la-javeriana-diapetics-ganador-en-premio-nacional-innovacion-dispositivos-medicos>

- [19] *ESP32-S3-WROOM-1 and ESP32-S3-WROOM-1U Datasheet*, Espressif Systems, Mar. 2026, versión 1.8, publicada el 2 de marzo de 2026. Accedido: 9 de mayo de 2026. [Online]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf
- [20] *CD74HCx4067 High-Speed CMOS Logic 16-Channel Analog Multiplexer and Demultiplexer*, Texas Instruments, Dec. 2024, hoja de datos, revisión D. Accedido: 9 de mayo de 2026. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4067.pdf>
- [21] *AMS1117 1-A Low-Dropout Voltage Regulator*, Advanced Monolithic Systems, Inc., hoja de datos. Accedido: 9 de mayo de 2026. [Online]. Available: <https://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
- [22] *SS34 SMD Schottky Barrier Rectifier, 2 Pads, SMA Series*, NextGen Components, Inc., Dec. 2021, hoja de especificaciones, revisión A0. Accedido: 9 de mayo de 2026. [Online]. Available: <https://www.mdddiodes.com/wp-content/uploads/2022/08/SMAS340000S34.pdf>
- [23] Phidgets Inc., “Load cell guide,” Phidgets Support and Documentation, Dec. 2023, accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: https://www.phidgets.com/docs/Load_Cell_Guide
- [24] *FlexiForce Standard Model A201 Sensor Datasheet*, Tekscan, Inc., Norwood, MA, USA, Dec. 2024, hoja de datos, revisión I, código de documento SDA201_Rev I_121224. Accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/resources/datasheets-guides/flexiforce-a201-datasheet>
- [25] *Pressure Mapping Sensor 5250 HT*, Tekscan, Inc., Norwood, MA, USA, hoja de datos, revisión A, código de documento SD_Rev A_020215. Accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/sites/default/files/resources/IDL-Pressure-Mapping-Sensor-5250HT-Datasheet.pdf>
- [26] *FSR 402 Data Sheet: FSR 400 Series Round Force Sensing Resistor*, Interlink Electronics, Inc., Camarillo, CA, USA, hoja de datos, revisión A. Sensor P/N 30-81794. Accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/assets/8/a/1/2/0/2010-10-26-Datasheet-FSR402-Layout2.pdf>
- [27] S. J. Morris, “A shoe-integrated sensor system for wireless gait analysis and real-time therapeutic feedback,” Doctor of Science dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, Jun. 2004, accedido: 15 de junio de 2026. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1721.1/28601>