



Monitorización Inteligente con Sensores Piezoeléctricos: Aplicación en IoT y Análisis de Presencia

Autor:

Juan Carlos Estefanía
Ovejero

Directora:

M. Victoria López

Trabajo Fin del Grado en Ingeniería Informática

2024-2025

Declaración de originalidad

Yo, **Juan Carlos Estefanía Ovejero**, con número de identificación 54444142Z, declaro que este trabajo titulado:

Monitorización Inteligente con Sensores Piezoelectrinos: Aplicación en IoT y Análisis de Presencia

es de mi autoría, y que no ha sido presentado previamente para obtener ningún otro título o reconocimiento académico en esta u otra institución. Confirmo que, en la medida en que he recurrido a trabajos de otras personas, se les ha dado el crédito correspondiente, citando y referenciando debidamente todas las fuentes.

Además, otorgo mi consentimiento expreso para que CUNEF Universidad pueda almacenar y difundir este trabajo a través de su biblioteca institucional, en formato físico o digital, permitiendo el acceso público con fines de consulta, investigación o docencia.

Fecha: 02/06/2025

Firmado:

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo e implementación de un sistema de monitorización de presencia mediante sensores piezoelectricos conectados a un microcontrolador ESP32. El objetivo principal ha sido diseñar una solución que permita detectar de forma eficiente la presencia y el comportamiento postural de usuarios al sentarse en entornos educativos y laborales. Para lograr esto, se ha creado un prototipo que capta datos de presión en tiempo real, los transmite mediante WiFi y los almacena en una hoja de cálculo de Google Sheets para su posterior análisis. El sistema ha sido construido utilizando cuatro sensores piezorresistivos conectados a entradas analógicas del ESP32, con una distribución que permite detectar variaciones de presión en distintos puntos del asiento. Durante las pruebas se verificó que los sensores son capaces de detectar cambios pequeños en la postura del usuario. Además de comprobar técnicamente el sistema, este trabajo también explora sus posibles aplicaciones en la optimización del uso de espacios permitiendo por ejemplo conocer en tiempo real qué puestos están ocupados. También se plantean futuras mejoras y aplicaciones como la ampliación del número de sensores, la calibración individual de los mismos o el uso de algoritmos de aprendizaje automático para el reconocimiento de patrones de comportamiento o estados anímicos como estrés o ansiedad. Todo el código asociado a este proyecto está disponible en el repositorio GitHub.

Palabras clave: Sensores piezoelectricos, ESP32, IoT, monitorización de ocupación, detección de presión, asientos inteligentes.

Abstract

This project presents the development and implementation of a presence monitoring system using piezoelectric sensors connected to an ESP32 microcontroller. The main objective has been to design a solution capable of efficiently detecting the presence and postural behavior of users when seated in educational and workplace environments. To achieve this, a prototype was created that captures real-time pressure data, transmits it via WiFi, and stores it in a Google Sheets spreadsheet for further analysis. The system was built using four piezoelectric sensors connected to the analog inputs of the ESP32, arranged in a way that allows detection of pressure variations at different points of the seat. During testing, it was verified that the sensors were capable of detecting small changes in the user's posture. In addition to the technical validation of the system, this work also explores its potential applications in optimizing space usage, for instance, by identifying in real time which seats are occupied. Future improvements and applications are also proposed, such as increasing the number of sensors, individually calibrating them, or using machine learning algorithms to recognize behavioral patterns or emotional states such as stress or anxiety. All code associated with this project is available in the following repository GitHub.

Keywords: Piezoelectric sensors, ESP32, IoT, occupancy monitoring, pressure sensing.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Declaración de originalidad | 2 |
| Resumen | 4 |
| Abstract | 5 |
| 1. Introducción y Estado del Arte | 7 |
| 1.1. Introducción | 7 |
| 1.2. Motivación y Objetivos | 7 |
| 1.3. Estado del Arte | 8 |
| 2. Materiales y metodología | 11 |
| 2.1. Materiales | 11 |
| 2.2. Metodología | 16 |
| 2.2.1. Pruebas realizadas | 16 |
| 2.2.2. Lógica del sistema | 17 |
| 2.3. Montaje del sistema final | 19 |
| 3. Arquitectura y diseño del sistema informático | 22 |
| 3.1. Descripción general del sistema | 22 |
| 3.2. Flujo de funcionamiento | 23 |
| 3.3. Diseño lógico del sistema | 24 |
| 3.4. Justificación de la disposición de los sensores | 25 |
| 4. Resultados | 27 |
| 4.1. Proceso de recolección y condiciones del experimento | 28 |
| 4.2. Visualización de datos | 29 |
| 4.3. Análisis de comportamiento | 30 |
| 4.4. Limitaciones y observaciones | 30 |
| 5. Conclusiones y trabajo futuro | 32 |
| Bibliografía | 34 |

1 Introducción y Estado del Arte

1.1 Introducción

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de monitorización de presencia basado en sensores piezoelectrivos capaces de detectar presión de una persona sentada o acostada. Este trabajo tiene como finalidad analizar el comportamiento de las personas sentadas en entornos educativos y/o laborales y poder analizar no sólo la presencia (en salas de espera o en aulas, por ejemplo) sino también el comportamiento (tranquilo, nervioso) del usuario.

Con la creciente integración de dispositivos IoT en distintos sectores, han surgido diferentes soluciones innovadoras para recopilar y analizar datos en tiempo real. En este contexto, este proyecto busca explorar el potencial de los sensores piezoelectrivos en la captura de datos de presión y su aplicación para optimizar el uso de espacios y analizar patrones de comportamiento en distintos entornos.

La gestión eficiente de los espacios es un desafío clave en múltiples ámbitos, desde oficinas hasta el transporte público, donde una mejor distribución de los recursos puede mejorar tanto la comodidad de las personas como la eficiencia en el trabajo. En concreto, en entornos académicos y laborales, disponer de herramientas que permitan analizar la ocupación de los espacios facilita la asignación óptima de áreas de trabajo, la optimización del uso de aulas y una planificación más eficiente de la infraestructura.

1.2 Motivación y Objetivos

En los últimos años, el avance de las tecnologías IoT ha transformado la manera en que interactuamos con el entorno, permitiendo la recopilación y análisis de datos en tiempo real. Un factor clave en esta transformación es el uso de sensores inteligentes, que han ido experimentando un crecimiento exponencial en sectores como la salud, la industria y la gestión de infraestructuras.

La monitorización de datos en entornos cerrados es una herramienta clave para mejorar la eficiencia de los servicios y la calidad de la experiencia de los usuarios. Los sensores piezoelectrivos ofrecen una solución innovadora y de bajo consumo energético para la detección de presión, facilitando la recolección de información en múltiples escenarios, como la ocupación de espacios, el tiempo de espera y la detección de movimientos en asientos.

Este proyecto busca demostrar la aplicabilidad de los sensores piezoelectrivos en entornos de uso cotidiano y evaluar su eficacia en la recopilación de datos útiles para la toma de decisiones. A diferencia de estudios previos centrados en ergonomía o automoción, este trabajo explora su uso en la planificación y optimización de espacios en entornos académicos y laborales. A través de la implementación de una red de sensores en escenarios reales, se busca analizar la calidad de los datos obtenidos y validar su precisión y fiabilidad mediante comparaciones con estudios previos.

En entornos educativos y espacios de trabajo, la monitorización de presencia basada en sensores piezoelectrómicos puede aportar múltiples beneficios. Por un lado, permite optimizar la disposición de las aulas y espacios de estudio ajustándose a la demanda real de estudiantes y personal, evitando el desperdicio de recursos. Además, el análisis de patrones de uso facilita la planificación de horarios y la distribución eficiente del mobiliario, asegurando un mejor aprovechamiento de los espacios disponibles. Esta información también podría ser clave para la toma de decisiones en universidades, oficinas y bibliotecas, mejorando la gestión del espacio y contribuyendo a la optimización de infraestructuras en función de la demanda y las tendencias de uso.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Diseñar e implementar un sistema de monitorización basado en sensores piezoelectrómicos.
- Evaluar la precisión y fiabilidad de los datos recopilados.
- Explorar posibles aplicaciones en análisis de presencia y tiempo de espera en espacios controlados.
- Validar los resultados obtenidos mediante comparación con modelos de referencia en estudios previos, identificando mejoras y limitaciones.

Este proyecto busca aportar una solución innovadora y útil, alineada con las tendencias tecnológicas actuales y con aplicaciones directas en la mejora de la eficiencia y gestión de espacios en diversos entornos.

1.3 Estado del Arte

Para comprender el estado actual de la tecnología y la viabilidad de esta investigación, se han analizado diversos estudios que exploran la monitorización mediante sensores en diferentes ámbitos.

La monitorización de presencia y movimiento mediante redes de sensores ha adquirido una creciente relevancia en aplicaciones orientadas a la evaluación de estados emocionales y detección de estrés, particularmente en contextos de salud mental. En este ámbito, el trabajo [9] presenta un enfoque para la detección de estados de riesgo en trastornos emocionales, utilizando técnicas inteligentes para interpretar señales fisiológicas y conductuales captadas por sensores distribuidos. En esta misma línea de investigación el artículo [8] propone el almacenamiento de los datos sensores en un cloud con el fin de facilitar su análisis posterior y demostrando la viabilidad de sistemas distribuidos y escalables en contextos clínicos.

De forma más específica el artículo [7] se centra en la codificación de señales generadas por un grid de sensores piezoelectrómicos. En este trabajo el objetivo es detectar y analizar mediante un modelo de lógica difusa la actividad motora en entornos de monitorización continua. Este enfoque resulta especialmente útil para el análisis de presencia en sillas sensorizadas, al permitir detectar micro-movimientos que podrían estar vinculados con episodios de inquietud, ansiedad o estrés. En conjunto, estos trabajos constituyen una base sólida para el desarrollo de soluciones avanzadas en el ámbito de la evaluación del comportamiento mediante redes sensoriales inteligentes, no obstante, este Trabajo Fin de Grado está más relacionado con esta última propuesta como se describe a continuación.

La detección de ocupación mediante sensores es un campo de investigación que ha crecido en los últimos años debido al auge de las tecnologías IoT. Estudiar trabajos previos

en este ámbito permite entender las soluciones existentes y establecer las bases para el desarrollo de nuevas aplicaciones. En esta revisión, se abordan diferentes enfoques en la literatura científica, organizados según su aplicación en la detección de ocupación con sensores piezoeléctricos, su uso en el sector automotriz y otros métodos alternativos.

Los sensores piezoeléctricos han sido muy utilizados en el análisis de ocupación en espacios cerrados. Estudios recientes han estudiado su aplicación en sillas inteligentes y sistemas de monitorización de posturas [4]. Estos sensores permiten registrar cambios en la distribución de peso y detectar patrones de uso en oficinas y salas de espera. Comparaciones entre distintos sistemas muestran que la combinación de sensores piezoeléctricos con algoritmos de aprendizaje automático mejora la precisión en la detección de posturas. A diferencia de otros sensores utilizados en la detección de ocupación, los sensores piezoeléctricos ofrecen una combinación de bajo consumo energético, facilidad de implementación y alta sensibilidad a cambios mínimos de presión, lo que los convierte en una opción viable para múltiples aplicaciones.

En el trabajo [5] se presenta una revisión exhaustiva sobre sillas inteligentes equipadas con sensores para la detección y clasificación de posturas. En su estudio, analizan diferentes estrategias y tecnologías utilizadas en la monitorización postural, destacando el uso de sensores piezoeléctricos y Force Sensing Resistors (FSRs) como las opciones más comunes. Además comparan modelos de machine learning como CNNs y ANNs, identificando sus limitaciones en precisión debido a la falta de diversidad en los conjuntos de entrenamiento. Este trabajo es relevante para nuestro estudio, ya que refuerza la viabilidad del uso de sensores piezoeléctricos en la monitorización de ocupación en tiempo real y resalta la importancia de evaluar la calidad de los datos recopilados para aplicaciones en optimización de espacios.

En el sector automotriz, los sensores de presión han sido ampliamente utilizados para la detección de ocupantes y la activación de sistemas de seguridad. Un estudio sobre sensores de activación de airbags en automóviles destaca que la combinación de datos provenientes de múltiples sensores permite reducir el margen de error en la identificación del ocupante hasta un 5 %, lo que mejora la precisión en la toma de decisiones sobre la activación del airbag [2]. Además, un análisis exhaustivo de 146 estudios en el ámbito del transporte público y privado revela que los métodos invasivos de detección de ocupación, aunque más precisos y económicos, presentan desafíos en términos de privacidad, mientras que los sensores no invasivos, como los piezoeléctricos, ofrecen una solución menos intrusiva pero con menor precisión en la estimación de ocupación [3]. Estos hallazgos refuerzan la importancia de evaluar la precisión de los sensores piezoeléctricos en aplicaciones de monitorización de ocupación, especialmente en entornos donde el respeto a la privacidad de los usuarios es un factor clave.

Además de los sensores piezoeléctricos, existen otros métodos utilizados para la detección de ocupación como los sensores *capacitivos*, *ópticos* y los sistemas de *visión por computadora*. Los sensores capacitivos tienen ventajas en la detección sin contacto, mientras que los sistemas de visión permiten el análisis de ocupación sin necesidad de sensores físicos en los asientos. Sin embargo, estos enfoques pueden tener limitaciones en entornos de baja iluminación o con interferencias externas.

A partir de esta revisión, observamos que los sensores piezoeléctricos presentan ventajas importantes en la detección de ocupación debido a su bajo consumo energético y su alta sensibilidad. Sin embargo, la mayoría de los estudios existentes se han centrado en aplicaciones específicas como la seguridad automotriz o la ergonomía en oficinas, dejando un margen de exploración en el análisis de ocupación en otros entornos.

En concreto, existe un vacío en la literatura científica en cuanto al uso de sensores piezoeléctricos para la gestión y optimización de espacios en entornos académicos y laborales.

Mientras que se ha ido estudiado la detección de ocupación en transporte o mobiliario inteligente, aún no se han desarrollado sistemas específicos para el análisis de ocupación en espacios educativos. Esta falta de desarrollo en la literatura muestra que aún no se ha evaluado el impacto de los sensores piezoeléctricos en la planificación estratégica de infraestructuras académicas, un aspecto clave para la optimización de recursos en estos sectores.

Dado el vacío mencionado, este trabajo busca aportar al conocimiento existente explorando nuevas aplicaciones de los sensores piezoeléctricos. Además, se evaluará su precisión y posibles integraciones con plataformas IoT, con el fin de optimizar la gestión de espacios en entornos académicos y laborales.

2 Materiales y metodología

Este capítulo describe los componentes físicos y el proceso de desarrollo del sistema de monitorización basado en sensores piezoelectríficos (piezorresistivos). Se incluyen los materiales utilizados, las pruebas iniciales realizadas para comprobar su funcionamiento además de la metodología seguida para programar el sistema y establecer la comunicación con la nube.

2.1 Materiales

A continuación se detallan los materiales utilizados en el desarrollo del sistema de monitorización. La mayoría de los componentes han sido elegidos por su compatibilidad con el microcontrolador ESP32 y su facilidad de integración con el hardware.

- **ESP32-S3 DevKitC-1:** microcontrolador principal del sistema, encargado de leer las señales procedentes de los sensores de presión, procesar los datos y enviarlos a la nube. El ESP32-S3 es un chip de 32 bits con arquitectura dual-core Xtensa LX7, que combina bajo consumo energético con gran capacidad de procesamiento. Se muestra en la Figura 2.1.

Además de contar con múltiples entradas analógicas para la conexión de sensores o demás, incluye conectividad inalámbrica WiFi y Bluetooth integrada, lo que permite establecer comunicación con servicios en la nube sin necesidad de módulos externos. Estas capacidades lo convierten en una muy buena opción para aplicaciones IoT (Internet of Things), como la monitorización remota en tiempo real desarrollada en este proyecto.

La facilidad de programación a través del entorno Arduino IDE junto con la amplia documentación y soporte de la comunidad, ha facilitado su integración en el sistema. En este proyecto el ESP32 está programado para leer datos analógicos desde sensores piezoelectríficos, etiquetarlos con marca de tiempo, y transmitirlos mediante WiFi a una hoja de cálculo de Google Sheets utilizando la API de Google.



Figura 2.1: ESP32-S3 DevKitC-1.

- **Breakout board para ESP32 (38 pines)**: placa adaptadora que facilita la conexión del ESP32 con otros componentes a través de pines accesibles para protoboard o conexiones soldadas (ver Figura 2.2).



Figura 2.2: Breakout board (38 pines).

- **Cables de datos USB-C (0.5 m)**: utilizados para la conexión del ESP32 con el ordenador para su programación y alimentación.
- **Resistencias de 10 kΩ**: componentes electrónicos utilizados junto a los sensores piezoelectrómicos para formar divisores de tensión. Estas resistencias permiten convertir las variaciones de resistencia de los sensores en señales de voltaje, que luego son leídas por las entradas analógicas del microcontrolador. En la Figura 2.3 se muestra el conjunto de resistencias utilizadas durante el montaje del sistema.

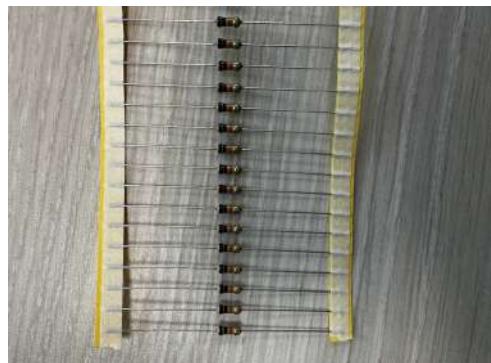


Figura 2.3: Resistencias de 10 kΩ utilizadas en el montaje del sistema.

- **Cables Dupont macho-hembra**: utilizados para realizar conexiones rápidas y desmontables entre los sensores de presión y el microcontrolador ESP32. Gracias a su compatibilidad con los pines estándar de la placa y su flexibilidad, permiten montar y probar el prototipo sin necesidad de soldaduras permanentes.
- **Cable eléctrico PVC 22 AWG (0.34 mm²)**: cableado flexible multicolor (ver Figura 2.4) utilizado para distribuir alimentación y señal entre los distintos componentes del sistema.



Figura 2.4: Cableado flexible multicolor.

- **Sensores de presión piezorresistivos MD30-60 (4 unidades)**: sensores cuya resistencia eléctrica varía en función de la fuerza aplicada sobre su superficie. Están diseñados para detectar presiones de hasta 30 kg, lo que los hace la perfecta opción para aplicaciones como la detección de ocupación en asientos.

Cada sensor tiene un área circular de aproximadamente 60 mm de diámetro y se comporta como una resistencia variable. A mayor presión, menor resistencia, lo que se traduce en una señal analógica más elevada al conectarlos a una entrada del microcontrolador. Este principio piezorresistivo permite transformar presión mecánica en una lectura eléctrica que puede ser registrada, interpretada y transmitida.

Su compatibilidad con conexiones de tipo analógico y su bajo consumo energético los convierten en la opción perfecta para sistemas portátiles orientados a IoT.

La Figura 2.5 muestra cómo es el sensor de presión utilizado.



Figura 2.5: Sensores de presión

En nuestro sistema los sensores se conectan junto con resistencias fijas en serie de $10\text{ k}\Omega$ formando divisores de tensión. Esta configuración permite convertir la variación de resistencia del sensor en un voltaje analógico que puede ser leído por los pines ADC del ESP32. La Figura 2.6 muestra el circuito de referencia que hemos implementado.

Reference Circuit

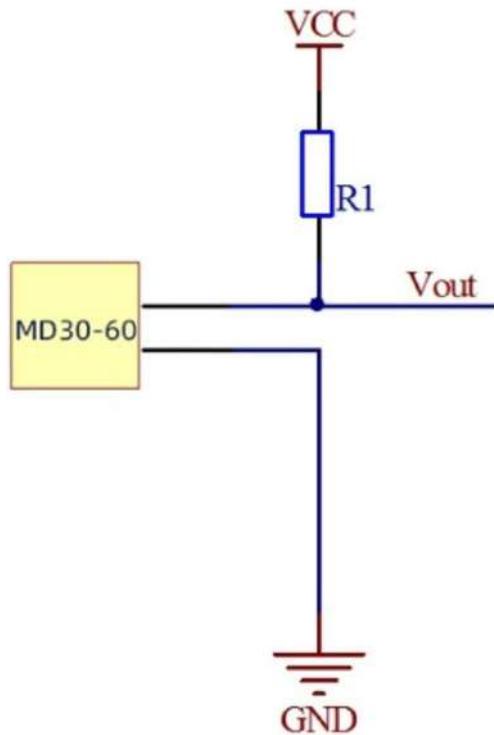


Figura 2.6: Configuración del sensor MD30-60 en un divisor de tensión con una resistencia fija(fuente: [6]).

La relación entre presión y resistencia es inversamente proporcional como se puede observar en el siguiente gráfico proporcionado por el fabricante (ver Figura 2.7). Esta curva permite estimar de forma aproximada la presión aplicada sobre el sensor a partir de la resistencia medida.

Pressure-Resistance Graph

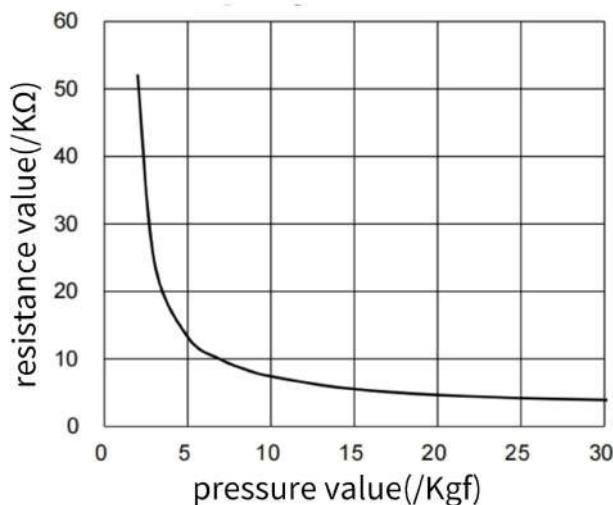


Figura 2.7: Gráfico de relación entre presión aplicada (kgf) y resistencia ($k\Omega$) en sensores MD30-60(fuente: [6]).

Para transformar esta resistencia en una señal de voltaje interpretable por el microcontrolador (el ESP32), se aplica la siguiente fórmula basada en un divisor de tensión

clásico:

$$A_{\text{out}} = \frac{R_{\text{sensor}}}{R_{\text{sensor}} + 10 \text{ k}\Omega} \cdot 5 \text{ V} \quad (2.1)$$

donde R_{sensor} representa la resistencia variable del sensor de presión, y $10 \text{ k}\Omega$ es el valor de la resistencia fija usada en el divisor. El resultado A_{out} , es el voltaje que el ESP32 leerá en su entrada analógica.

Este proceso de conversión se realiza de forma interna por el ADC (conversor analógico-digital) del microcontrolador pero su fundamento se basa en esta fórmula de referencia empleada en trabajos previos similares como [10].

Montaje inicial y problemas durante la soldadura

Durante una de las primeras sesiones prácticas se realizó el intento de soldar manualmente los sensores de presión. Fue una tarea complicada que requería mucha precisión, ya que las terminales de los sensores eran pequeñas y muy sensibles al calor, lo que dificultaba obtener una conexión fija y de calidad. En la Figura 2.8 se muestra el momento en el que se estaban soldando los sensores con cables.



Figura 2.8: Intento de soldadura de sensores de presión de manera manual.

Durante este proceso surgieron varios problemas, como la dificultad para fijar los cables de forma segura sin dañar los sensores y la inestabilidad de las conexiones tras varios intentos. Por esta razón, se decidió optar por sensores ya montados y encapsulados que incluían salidas para cables ya integradas, facilitando tanto las pruebas con el multímetro como su integración con el ESP32.

Aún así, tras el montaje se realizaron pruebas utilizando un multímetro digital para comprobar que los sensores montados manualmente eran capaces de generar una señal

eléctrica en respuesta a la presión. El multímetro se configuró en modo voltímetro de corriente continua (DC) y se conectó a las salidas del sensor. Al aplicar presión sobre la superficie del sensor, se observaron variaciones de voltaje, confirmando su funcionamiento.

Al final la decisión de optar por sensores previamente montados en vez de ir montándolos manualmente, permitió continuar con el montaje del prototipo de forma más eficiente, asegurando conexiones más fiables y reduciendo el riesgo de fallos por un mal contacto o soldaduras débiles.

2.2 Metodología

Este sistema ha sido implementado sobre un microcontrolador ESP32 programado desde el entorno de desarrollo Arduino IDE en el lenguaje de programación C++. A diferencia de versiones previas basadas en el Bluetooth Low Energy (BLE), esta versión final utiliza conexión WiFi para enviar los datos leídos desde los sensores a una hoja de cálculo en Google Sheets, permitiendo así su almacenamiento y posterior análisis en la nube.

El código fue desarrollado en Arduino IDE e incluye el uso de varias librerías externas. La librería `ESP_Google_Sheet_Client.h` permite la comunicación directa con hojas de cálculo de Google Sheets mediante una cuenta de servicio de Google Cloud. Además `WiFi.h` gestiona la conectividad inalámbrica del ESP32, mientras que `GS_SDHelper.h` y `FirebaseJson.h` intervienen en el manejo de datos estructurados y el almacenamiento en la nube. El archivo `secrets.h` almacena por separado todas las credenciales sensibles necesarias para la autenticación segura del dispositivo.

2.2.1 Pruebas realizadas

Para comprobar el funcionamiento de los sensores y garantizar una integración adecuada con el microcontrolador ESP32, se llevaron a cabo distintas pruebas utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. Estas pruebas permitieron verificar el comportamiento de los componentes electrónicos y evaluar distintas formas de lectura de datos. A continuación se describen brevemente las pruebas más relevantes:

Prueba de encendido de LED

Esta fue la prueba inicial para comprobar que el ESP32 estaba correctamente conectado al entorno de desarrollo y que la comunicación entre el microcontrolador y el ordenador funcionaba correctamente. Se programó un código básico para encender y apagar un LED conectado a uno de los pines digitales, simulando una salida digital básica.

Prueba con botón

Posteriormente, se realizó una prueba de entrada digital utilizando un botón físico conectado al ESP32. Esta prueba sirvió para verificar el correcto reconocimiento de pulsaciones y los estados de HIGH y LOW que se generan al presionar o soltar el botón, similar al funcionamiento esperado con sensores de presión digitales.

Prueba con potenciómetro

A continuación, se probó un potenciómetro como entrada analógica. Esta prueba nos resultó útil para simular el comportamiento de un sensor de presión con salida variable,

evaluando cómo variaban los valores analógicos dependiendo de la intensidad de giro, de manera similar a cómo se comportan algunos sensores de presión.

Prueba combinada: potenciómetro + BLE

Se realizó una variante en la que se combinó el uso del potenciómetro con comunicación vía Bluetooth(BLE) en donde se enviaban los datos vía Bluetooth a una app externa. Esta prueba permitió comprobar cómo se podían enviar datos en tiempo real a otros dispositivos sin necesidad de cables. El problema que encontramos con el uso del Bluetooth, es que el sistema dependía de una app externa para visualizar los datos e iba a suponer un problema a la hora de realizar las pruebas finales, ya que dependía de una conexión constante con otro dispositivo para poder observar los datos que además se guardaban sin un formato.

Prueba con dos sensores piezoelectricos + WIFI

Finalmente se implementó una prueba con dos sensores piezoelectricos conectados simultáneamente. Esta prueba fue clave para validar la lectura analógica de señales provenientes de sensores reales. Permitió comprobar la sensibilidad de los sensores, la estabilidad de las lecturas y cómo reaccionaban ante la presión ejercida en diferentes momentos. Esta prueba también incorporó el uso del módulo WiFi del ESP32 para enviar los datos directamente a una hoja de cálculo de Google Sheets en vez de depender de una app externa para visualizar los datos como en el caso de la prueba con el BLE. Esto permitió hacer una aproximación al prototipo final además de comprobar el correcto funcionamiento de la conexión inalámbrica y del sistema completo de recolección y almacenamiento de datos en la nube.

2.2.2 Lógica del sistema

A continuación se describe la lógica de funcionamiento del sistema.

1. Configuración del entorno WiFi y sincronización horaria

En primer lugar se establece la conexión con una red WiFi mediante las credenciales definidas en el archivo externo `secrets.h`. Este archivo contiene información como el nombre y la contraseña de la red WiFi, el correo del proyecto, el ID del proyecto y la clave privada generada en Google Cloud. Separar estas credenciales del código principal mejora la seguridad y organización del proyecto.

Además se configura la hora del sistema usando un servidor NTP (Network Time Protocol), lo que permite al ESP32 obtener la hora global (UTC) y etiquetar correctamente los datos con una marca de tiempo(timestamp).

```
WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
configTime(0, 0, ntpServer);
```

2. Inicialización del cliente de Google Sheets

Para iniciar la comunicación con la hoja de cálculo en la nube, se utiliza la función `GSheet.begin()`, que recibe como parámetros las credenciales del proyecto en Google Cloud. También se define una función de callback para gestionar errores relacionados con el token de acceso.

```
GSheet.setTokenCallback(tokenStatusCallback);  
GSheet.begin(CLIENT_EMAIL, PROJECT_ID, PRIVATE_KEY);
```

3. Lectura de sensores piezoelectricos

El sistema está diseñado para leer cuatro sensores de presión conectados a pines analógicos del ESP32. En cada ciclo del programa se recogen sus valores mediante la función `analogRead()`:

```
const int sensorPins[4] = {34, 35, 32, 33};  
for (int i = 0; i < 4; i++) {  
    sensorValues[i] = analogRead(sensorPins[i]);  
}
```

Esta lectura se realiza cada 10 segundos, controlada por la variable `timerDelay`, que define el intervalo entre envíos.

4. Obtención de la marca temporal

Se obtiene la marca de tiempo actual (`timestamp`) en formato UNIX mediante una función auxiliar que consulta el tiempo sincronizado por NTP:

```
unsigned long getTime() {  
    time_t now;  
    struct tm timeinfo;  
    if (!getLocalTime(&timeinfo)) return 0;  
    time(&now);  
    return now;  
}
```

Este `timestamp` se incluirá en cada fila enviada a la hoja de cálculo para permitir una organización temporal de los datos.

5. Creación del objeto JSON con los datos

Una vez obtenidos los valores de los sensores y la marca temporal, se crea un objeto JSON utilizando la librería `FirebaseJson`. Este objeto contiene los datos estructurados en columnas:

```
data.set("values/[0]/[0]", epochTime);  
data.set("values/[1]/[0]", sensorValues[0]);  
data.set("values/[2]/[0]", sensorValues[1]);  
data.set("values/[3]/[0]", sensorValues[2]);  
data.set("values/[4]/[0]", sensorValues[3]);
```

6. Envío de datos a Google Sheets

Finalmente el objeto JSON es enviado a la hoja de cálculo mediante la función `append()`:

```
GSheet.values.append(&response, spreadsheetId, "Datos!A2", &data);
```

Si el envío es exitoso el sistema imprime en el monitor serial el contenido del objeto de respuesta recibido por parte de Google, lo cual permite comprobar que los datos han sido correctamente almacenados.

Esto permite almacenar los datos de forma segura y da la posibilidad consultar su evolución a lo largo del tiempo desde cualquier dispositivo con acceso a la hoja de cálculo.

El código fuente completo del sistema incluyendo la configuración del ESP32, el envío de datos a Google Sheets y las credenciales protegidas está disponible en el siguiente repositorio público de GitHub: <https://github.com/jcestefania/pressure-sensor-seat>

2.3 Montaje del sistema final

Una vez comprobado el funcionamiento de los sensores y configurado el sistema de envío de datos a la nube se procedió a realizar el montaje final del prototipo. Este incluyó la conexión física de los sensores piezoelectrivos al ESP32 mediante cables Dupont y el uso de resistencias para estabilizar las señales analógicas.

Se utilizó una distribución de cuatro sensores colocados en forma de cuadrado sobre la superficie del asiento, lo que permite detectar presión en diferentes puntos de forma equilibrada, en los próximos capítulos se profundizará más sobre el porqué de esa distribución. Cada sensor fue conectado a un pin analógico del ESP32, y se añadieron resistencias en serie de $10\text{ k}\Omega$ para garantizar la estabilidad de lectura y evitar fluctuaciones inesperadas. Al principio se probaron otras resistencias de menor valor, pero se observó que no permitían detectar correctamente la presión (había que hacer mucha fuerza en los sensores para poder ver la señal). Tras realizar varias pruebas se comprobó que con resistencias de $10\text{ k}\Omega$ el sistema ofrecía una mayor sensibilidad y una respuesta más lineal frente a cambios de presión por lo que se utilizaron de forma definitiva en el montaje final.

La Figura 2.9 muestra el esquema general de conexión entre los sensores, el ESP32 y las resistencias. En la Figura 2.10 se puede observar el montaje físico real. Por último en la Figura 2.11 se puede observar el montaje definitivo sobre la superficie de pruebas, donde se aprecia la disposición del cableado, los sensores fijados y el microcontrolador conectado a la fuente de alimentación.

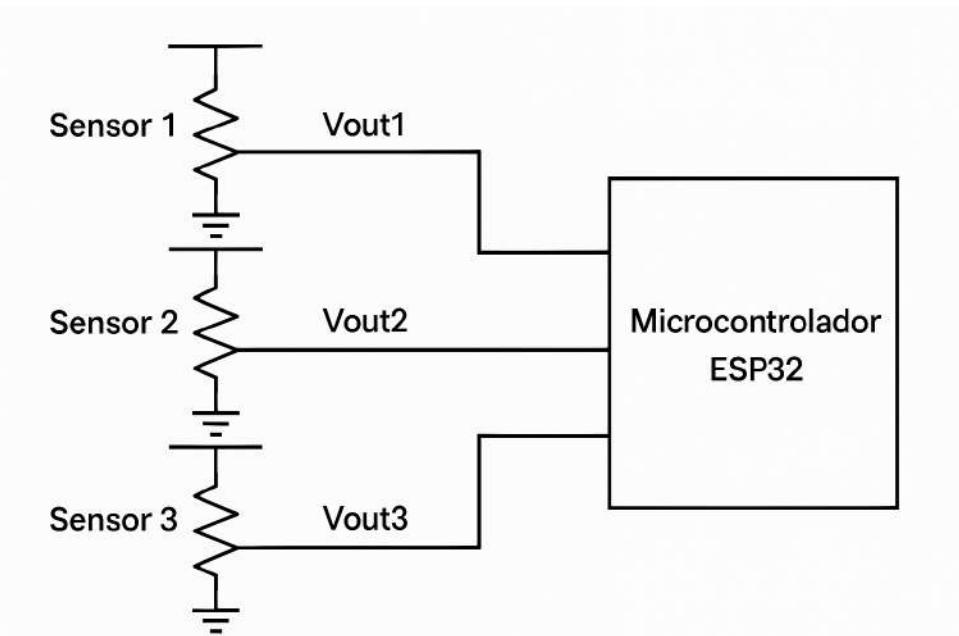


Figura 2.9: Esquema de conexiones del sistema: sensores piezoeléctricos, resistencias y ESP32.

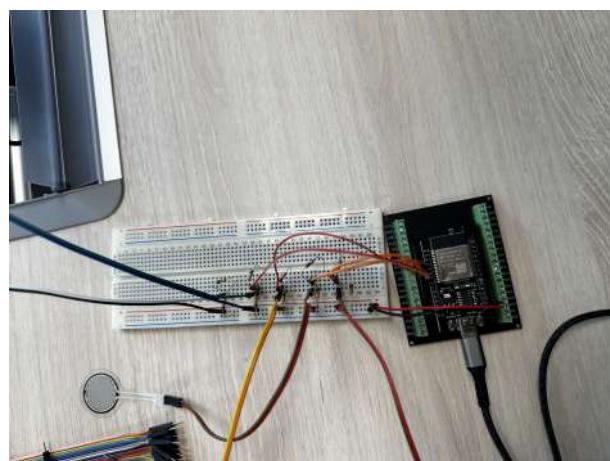


Figura 2.10: Montaje físico del sistema final con sensores conectados al ESP32.

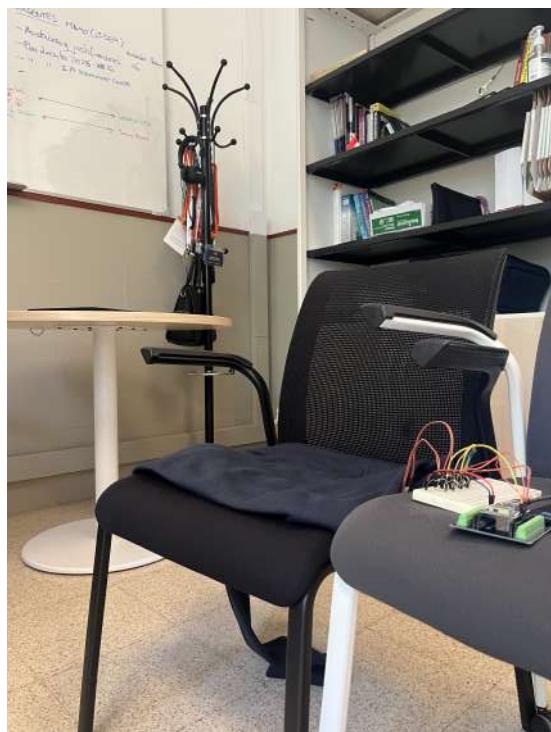


Figura 2.11: Montaje final.

3 Arquitectura y diseño del sistema informático

3.1 Descripción general del sistema

El sistema propuesto, permite la detección de presencia mediante sensores piezoeléctricos instalados en una superficie y conectados al microcontrolador ESP32. Este último se encarga de leer las señales de presión, sincronizar la hora actual y enviar los datos a una hoja de cálculo de Google Sheets a través de una conexión WiFi.

La arquitectura del sistema se divide en los siguientes bloques principales:

- **Sensores piezoeléctricos:** detectan la presión ejercida sobre la superficie del asiento. En este proyecto se han usado cuatro sensores en una configuración cuadrada, que permite cubrir de la manera más eficiente el área de contacto con el usuario.
- **Microcontrolador ESP32:** realiza la lectura de los sensores mediante entradas analógicas. Además, se conecta a una red WiFi y se encarga de empaquetar y enviar los datos a la nube.
- **Servidor NTP:** proporciona la hora actual vía Internet, lo que permite registrar con precisión la marca temporal de cada conjunto de datos enviados.
- **Google Sheets:** actúa como plataforma de almacenamiento remoto. La hoja de cálculo registra los datos enviados por el ESP32, permitiendo su posterior visualización, análisis o descarga desde cualquier dispositivo conectado.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema general de la arquitectura del sistema desarrollado.

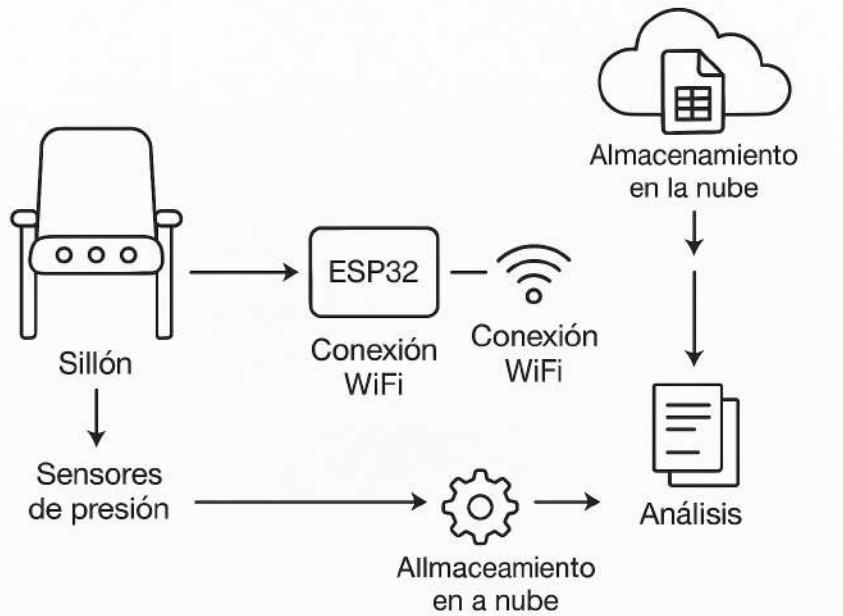


Figura 3.1: Esquema general del sistema de monitorización con sensores piezoelectricos.
(Fuente: creación propia)

3.2 Flujo de funcionamiento

El funcionamiento del sistema se basa en una secuencia cíclica de lectura, procesamiento y transmisión de datos. Esta lógica se ejecuta de manera continua en el microcontrolador ESP32 y permite recopilar información en tiempo real sobre la ocupación de un asiento.

A continuación, se describen los pasos que sigue el sistema creado:

- Lectura de sensores:** el ESP32 realiza la lectura de los valores analógicos procedentes de los cuatro sensores piezoelectricos conectados a sus pines. Cada sensor refleja una variación de voltaje proporcional a la presión ejercida sobre su superficie.
- Obtención de la hora actual:** el microcontrolador sincroniza la hora con un servidor NTP (Network Time Protocol) para incluir una marca temporal precisa en los datos.
- Construcción del paquete de datos:** los valores leídos junto con la hora actual, se estructuran en formato JSON utilizando la librería `FirebaseJson`. Este formato es el requerido por la API de Google Sheets.
- Envío de datos a Google Sheets:** cuando el ESP32 está conectado a la red WiFi y la autenticación con Google Cloud es válida, los datos se envían a la hoja de cálculo mediante la librería `ESP_Google_Sheet_Client`. En caso de que algo falle, se muestra un mensaje en el monitor serial.
- Espera antes de la siguiente iteración:** el sistema espera un intervalo de tiempo (10 segundos en la versión actual) antes de volver a iniciar el ciclo.

Este proceso se ilustra en la Figura 3.2, que resume gráficamente el flujo de funcionamiento del sistema.

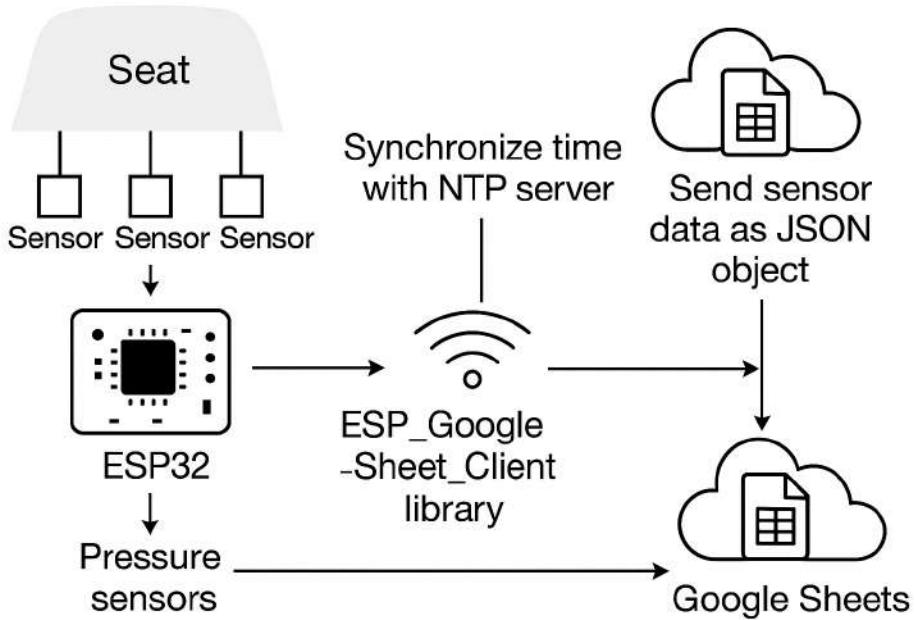


Figura 3.2: Flujo general de funcionamiento del sistema de monitorización. (Fuente: creación propia)

3.3 Diseño lógico del sistema

Como ya ha sido mencionado, el sistema ha sido implementado utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE, donde se ha desarrollado un programa en C++ para el microcontrolador ESP32. El diseño lógico del sistema sigue una estructura simple pero efectiva, compuesta por dos bloques principales: la función `setup()` y la función `loop()`.

Inicialización del sistema: `setup()`

Durante la fase de inicialización, el sistema realiza varias tareas fundamentales. En primer lugar, se establece la velocidad de la comunicación serie para permitir la depuración y el monitoreo desde el entorno de desarrollo. A continuación, el ESP32 intenta conectarse a la red WiFi utilizando las credenciales almacenadas de forma segura en el archivo `secrets.h`, separando así los datos sensibles del código principal.

Una vez establecida la conexión, se sincroniza la hora actual mediante un servidor NTP lo que permite etiquetar cada lectura con una marca temporal precisa. Por último, se inicializa el cliente de Google Sheets utilizando los parámetros del proyecto definidos en Google Cloud (correo, ID del proyecto y clave privada), estableciendo una conexión segura con la hoja de cálculo donde se almacenarán los datos.

Funcionamiento principal: `loop()`

Seguido de la inicialización, el sistema entra en un ciclo continuo gestionado por la función `loop()`. En cada iteración, se comprueba si el cliente de Google Sheets está preparado para enviar datos y si ha transcurrido el intervalo de tiempo definido desde la última captura.

Si ambas condiciones se cumplen, el sistema procede a leer los valores analógicos de los cuatro sensores piezoelectrónicos conectados a los pines del ESP32. A continuación, se

recupera la hora actual (sincronizada previamente por NTP) y se construye un objeto JSON que contiene la marca temporal junto a las lecturas de cada sensor.

Este objeto se envía a la hoja de cálculo de Google Sheets mediante la API de Google. La respuesta del servidor se muestra por consola permitiendo verificar si el envío fue correcto o si se produjo algún error, el cual también se detalla. Gracias a esta arquitectura, el sistema es capaz de recopilar datos de forma autónoma y remota, sin necesidad de intervención manual, y en un formato estructurado que permite su posterior análisis o integración con otras plataformas.

3.4 Justificación de la disposición de los sensores

Uno de los aspectos más importantes a la hora de diseñar un sistema de monitorización basado en sensores piezoelectricos es la disposición física de los sensores sobre la superficie de contacto. En este trabajo, se ha optado por utilizar cuatro sensores dispuestos en forma de cuadrado sobre un asiento, de forma que cubran las principales zonas de apoyo del usuario.

La elección de esta distribución se basa en varios factores. En primer lugar, el cuadrado permite una cobertura equilibrada del área útil del asiento, facilitando la detección de ocupación incluso cuando el usuario no se sienta completamente centrado. Además, esta disposición simplifica el cableado y el montaje físico del prototipo, ya que se utilizan solo cuatro puntos de entrada analógica al microcontrolador ESP32, reduciendo la complejidad del sistema y los errores potenciales en la lectura de señales.

Desde el punto de vista funcional, esta distribución permite identificar no solo si hay una persona sentada, sino también diferencias de presión en las distintas zonas del asiento, lo que puede dar lugar a interpretaciones relacionadas con la postura o el peso distribuido. Aunque el objetivo de este proyecto no es realizar un análisis postural detallado, la disposición elegida permite una base sólida para futuras ampliaciones, como la detección de patrones de movimiento o la clasificación de tipos de presencia.

La elección de esta disposición también ha estado motivada por la revisión de investigaciones previas en las que se emplean matrices de sensores piezoelectricos para analizar patrones de presión. Un ejemplo destacado es el trabajo desarrollado por los autores de [7], en el que se propone una rejilla de sensores piezoelectricos organizada en una matriz de 3x4, con el objetivo de analizar la actividad motora de personas en el ámbito de la salud mental.

En este estudio, los autores desarrollan una lógica de codificación para identificar patrones de activación de los sensores en función de la presión ejercida por los usuarios en diferentes puntos. A través de esta codificación, el sistema es capaz de detectar movimientos repetitivos, configuraciones conectadas y niveles de actividad asociados a estados de agitación o relajación.

Aunque el enfoque del trabajo actual es distinto (centrado en la ocupación y optimización de espacios, no en salud), la idea de utilizar una distribución lógica de sensores para obtener información relevante a partir de los patrones de presión resulta altamente aplicable en este trabajo. La inspiración tomada del artículo mencionado ha servido para confirmar que una disposición física estructurada (aunque más simple) puede proporcionar datos significativos incluso con un número reducido de sensores.

Se ha optado por una configuración más reducida (2x2 en lugar de 3x4) por motivos de simplicidad, bajo coste, facilidad de montaje y también para adaptarse a los objetivos del proyecto, que no requieren alta resolución espacial. Esta solución simplificación

también mantiene la posibilidad de ampliación en el futuro si se desea mayor precisión o complejidad analítica.

4 Resultados

El sistema desarrollado, como ya se mencionó en anteriores capítulos, almacena los datos recogidos en una hoja de cálculo de Google Sheets (ver Figura 4.1). Cada fila corresponde a una nueva lectura de los sensores realizada en intervalos regulares de aproximadamente 10 segundos. La estructura de la tabla es la siguiente:

- **timestamp**: representa la marca de tiempo en formato UNIX (número de segundos desde el 1 de enero de 1970). Permite conocer el momento exacto en que se ha registrado cada lectura.
- **sensor1, sensor2, sensor3, sensor4**: cada una de estas columnas contiene el valor analógico registrado por un sensor piezoeléctrico. Cuanto mayor es el valor, mayor presión registrará el sensor en ese momento.

Los valores recogidos por los sensores son variables de tipo entero que oscilan entre 0 (sin presión detectada) y un valor máximo que puede superar los 4000, dependiendo de la fuerza aplicada sobre el sensor.

Este formato de representación de los datos de presión permite un análisis de tiempo y además también permite la comparación de presiones entre los cuatro sensores, facilitando la detección de patrones de ocupación y comportamiento del usuario.

| | A | B | C | D | E |
|----|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | timestamp | sensor1 | sensor2 | sensor3 | sensor4 |
| 2 | 1748346901 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1748346911 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1748346921 | 1846 | 2309 | 0 | 4095 |
| 5 | 1748346931 | 2549 | 2745 | 4095 | 3277 |
| 6 | 1748346941 | 615 | 0 | 3244 | 2762 |
| 7 | 1748346951 | 1008 | 0 | 3966 | 3760 |
| 8 | 1748346961 | 0 | 3134 | 2863 | 3444 |
| 9 | 1748346971 | 0 | 0 | 1919 | 3482 |
| 10 | 1748346981 | 2031 | 0 | 3031 | 3537 |
| 11 | 1748346991 | 2448 | 3813 | 4095 | 3412 |
| 12 | 1748347001 | 2256 | 3198 | 4095 | 3088 |
| 13 | 1748347011 | 2585 | 3564 | 3643 | 0 |
| 14 | 1748347021 | 1827 | 3020 | 3846 | 0 |
| 15 | 1748347031 | 1967 | 3018 | 4095 | 0 |
| 16 | 1748347041 | 2192 | 1601 | 3426 | 3435 |
| 17 | 1748347051 | 2235 | 2226 | 3197 | 3157 |

Figura 4.1: Ejemplo de los datos almacenados en Google Sheets durante la prueba experimental.

4.1 Proceso de recolección y condiciones del experimento

Para comprobar el funcionamiento de los sensores, se realizó una prueba práctica en condiciones reales de uso. La prueba consistió en sentarse sobre el asiento donde estaban instalados los cuatro sensores piezoelectricos, permaneciendo en reposo durante unos minutos y realizando movimientos ligeros de cambio de postura para simular movimientos involuntarios de acomodación en el asiento.

Durante el experimento, el ESP32 estuvo conectado a una red WiFi local enviando los datos de los sensores a la hoja de cálculo configurada en Google Sheets. Las lecturas se realizaron con un intervalo temporal aproximado de 10 segundos y en cada captura se registraron los valores analógicos de los cuatro sensores.

Esta prueba fue muy útil para poder comprobar cómo respondían los sensores ante la presión ejercida por una persona al estar sentado y a cómo reaccionaban ante movimientos o desplazamientos del peso de la persona sobre el asiento. Además de esto también se comprobó el correcto funcionamiento del sistema completo, la recolección, transmisión y almacenamiento de los datos en la nube.

4.2 Visualización de datos

Para tener una primera aproximación visual a los datos recogidos durante las pruebas, se han representado las lecturas de los sensores de presión a lo largo del tiempo. En la Figura 4.2 se observa cómo van variando los valores detectados por cada uno de los cuatro sensores durante una sesión de prueba en la que una persona estuvo sentado en el sistema durante aproximadamente 3 minutos.

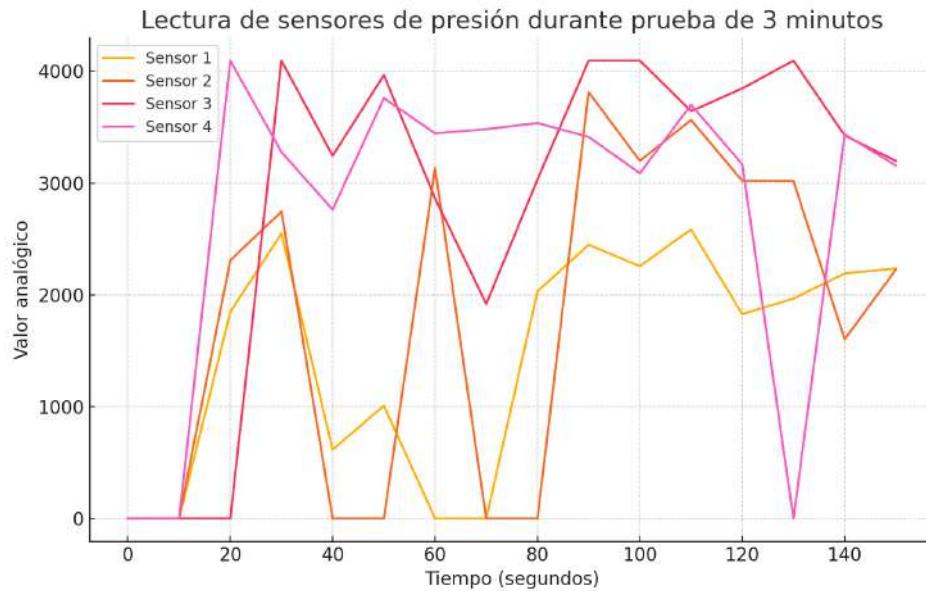


Figura 4.2: Evolución temporal de la presión detectada por los sensores durante una sesión de prueba.

Como puede observarse, hay tramos donde los sensores detectan valores nulos (presión cero), lo que corresponde a momentos en los que no había carga sobre los sensores. En cambio, en otras zonas los valores aumentan de forma significativa, lo cual indica la presencia del usuario o cambios en su postura. Estas oscilaciones reflejan cómo el sistema es capaz de registrar diferencias de presión y cómo estos valores pueden ser usados para estudiar el comportamiento del usuario sobre el asiento.

Estas pruebas permitieron comprobar cómo responde el sistema ante variaciones más dinámicas de presión y cómo los datos reflejan esos cambios. La Figura 4.3 muestra algunas imágenes representativas capturadas durante las sesiones, que ilustran las distintas posiciones adoptadas por los usuarios.



(a) Pierna cruzada.



(b) Postura adelantada.



(c) Sentado recto.

Figura 4.3: Varias posturas registradas durante las pruebas experimentales con los sensores.

4.3 Análisis de comportamiento

A partir de los datos obtenidos en la primera prueba de funcionamiento, es posible hacer una primera interpretación del comportamiento del usuario en función de los valores registrados por los sensores.

En los momentos en los que los cuatro sensores marcan valores cercanos a cero, se puede asumir que no hay contacto físico con el sistema, es decir, que el asiento está libre. Por el contrario, la aparición de valores elevados en todos los sensores de forma simultánea indica que el usuario está completamente sentado, ejerciendo presión sobre toda la superficie.

Durante la sesión de prueba, se observan pequeñas fluctuaciones en algunos sensores mientras otros permanecen bastante estables. Esto sugiere que el usuario realizó pequeños movimientos, como desplazamientos de peso, cambios en la posición de las piernas o inclinaciones del tronco. Estas variaciones permiten detectar no solo la ocupación, sino también comportamientos posturales.

Por ejemplo, si un sensor lateral muestra un pico de presión mientras el opuesto mantiene un valor bajo, es probable que el usuario esté apoyando más peso en un lado. De igual forma, si la presión baja gradualmente, puede interpretarse como un inicio de levantamiento o alivio de carga.

Este análisis permitirá avanzar hacia sistemas más complejos de reconocimiento postural o detección de inactividad prolongada, funcionalidades especialmente útiles en entornos como bibliotecas, aulas o salas de espera. No obstante, debido a que las pruebas fueron realizadas por un único usuario en una única sesión, los resultados deben considerarse preliminares y no generalizables.

4.4 Limitaciones y observaciones

A lo largo del desarrollo e implementación del sistema se han identificado una serie de limitaciones que es importante señalar ya que permiten entender el alcance actual del proyecto y pensar mejoras para futuras versiones.

En primer lugar, aunque en un inicio se consideró la utilización de cinco sensores piezoelectricos, finalmente se optó por emplear cuatro, colocados en forma de cuadrado. Esta elección permite realizar una detección básica de la ocupación y obtener cierta información sobre la distribución del peso, pero reduce la precisión para el análisis de posturas

más complejas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la variabilidad en la sensibilidad de los sensores. Durante las pruebas se observó que algunos sensores reaccionaban de forma más marcada que otros ante la misma presión, lo que puede generar lecturas desiguales y dificultar una interpretación uniforme. Esta diferencia de comportamiento se acentúa por la falta de una calibración individualizada para cada sensor, lo cual habría permitido ajustar las lecturas y minimizar desviaciones.

Además en algunos momentos se detectaron pequeñas variaciones en las lecturas incluso cuando no había cambios claros en la presión. Esto puede deberse a interferencias eléctricas o al propio nivel de sensibilidad de los sensores, que captan incluso variaciones mínimas o ruido de fondo.

Por otro lado las condiciones del experimento también suponen una limitación. La prueba se realizó con un único usuario y durante un periodo breve de tiempo, por lo que los datos recogidos no permiten generalizar conclusiones a otros perfiles de usuario o situaciones.

A pesar de estas limitaciones, el sistema ha demostrado ser funcional y establece una buena base para desarrollos futuros. Incorporar un mayor número de sensores para hacerlo lo más preciso posible, aplicar técnicas de calibración en los sensores, realizar pruebas con el mayor número de usuarios posible y utilizar métodos de análisis más elaborados permitiría ampliar el alcance del sistema y mejorar tanto su precisión como su aplicabilidad en entornos reales.

5 Conclusiones y trabajo futuro

En este Trabajo Fin de Grado, se ha demostrado la viabilidad de un sistema de monitorización de ocupación basado en sensores piezoeléctricos y un microcontrolador ESP32 con conectividad a la nube. A lo largo de todo el proyecto se ha conseguido implementar un flujo completo de captura, transmisión y almacenamiento de datos, utilizando herramientas como Google Sheets. Esto ha permitido comprobar en una primera fase experimental, cómo el sistema es capaz de detectar variaciones de presión asociadas a la ocupación y a los cambios de postura de un usuario sentado.

A pesar de las dificultades iniciales como los problemas provocados de la soldadura manual de sensores o la variabilidad en la sensibilidad de los sensores, el prototipo ha mostrado funcionar de manera sólida y ha permitido llevar a cabo pruebas en un entorno controlado demostrando que funciona correctamente. El envío de datos en tiempo real a través de WiFi y su almacenamiento estructurado en la nube han sido aspectos clave para validar la arquitectura planteada, alineada con las tendencias actuales en sistemas IoT.

Entre todos los resultados, lo que más destaca es la capacidad del sistema para registrar de forma continua información sobre la ocupación del asiento y detectar movimientos sutiles. Aunque las pruebas se realizaron con un único usuario, la recodiga en el tiempo de los datos ha demostrado que los sensores responden correctamente a los cambios de presión, lo cual establece una buena base para análisis más avanzados en futuras versiones del sistema.

Para el futuro existen varias posibles opciones de mejora. El aumento de la cantidad de sensores podría permitir una monitorización más precisa del patrón de ocupación, además de una mejor detección de la postura del usuario. También sería recomendable implementar una calibración individualizada para cada sensor con el objetivo de compensar las diferencias de sensibilidad y mejorar la calidad de los datos recogidos. Otra aplicación interesante podría ser el uso de técnicas de análisis de datos, como algoritmos de aprendizaje automático, que permitirían clasificar comportamientos, detectar patrones repetitivos o incluso predecir situaciones de riesgo asociadas a la inactividad. También sería útil probar el sistema con distintos perfiles de usuario y diseñar una interfaz visual que facilite la consulta de los datos en tiempo real desde dispositivos externos como el desarrollo de una app por ejemplo que permita la monitorización de una manera más accesible.

Además del valor técnico del prototipo desarrollado, el sistema desarrollado también tiene un gran potencial de aplicación práctica. La capacidad que tiene para detectar la presencia de usuarios en asientos en tiempo real abre la puerta a su uso en la gestión eficiente de espacios en entornos como universidades, bibliotecas e incluso en oficinas. Utilizándolo en sistemas más amplios de planificación y monitorización, permitiría saber en todo momento qué puestos están siendo utilizados, qué lugares son los más transitados, optimizar la asignación de recursos como sillas o mesas e incluso detectar patrones de uso con fines analíticos o de mantenimiento.

En conclusión, este trabajo ha mostrado un primer acercamiento a la integración de sensores piezoeléctricos en sistemas de monitorización inteligentes. Las experiencias

recogidas durante el proceso aportan un conocimiento muy útil tanto a nivel técnico como metodológico y abren la puerta al desarrollo de soluciones más robustas y adaptadas a entornos reales en el ámbito educativo, sanitario o laboral.

Bibliografía

- [1] FREENOVE, *Ultimate Starter Kit for ESP32-S3 - Tutorial*, 2023. Disponible en: <http://freenove.com/fnk0082>.
- [2] ELNASHAR, F. A. Y ZLATTEV, Z., *Analysis of Data from Software Sensors for Smart Airbags Deployment*, *Adv. Robotics and Automation*, 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.4172/2168-9695.1000181>.
- [3] KUCHÁR, P., PIRNÍK, R., JANOTA, A., MALOBICKÝ, B., KUBÍK, J. Y ŠIŠIMŠOVÁ, D., *Passenger Occupancy Estimation in Vehicles: A Review of Current Methods and Research Challenges, Sustainability*, vol. 15, 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15021332>.
- [4] MATUSKA, S., PARALICI, M. Y HUDEC, R., *A Smart System for Sitting Posture Detection Based on Force Sensors and Mobile Application*, *Mobile Information Systems*, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2020/6625797>.
- [5] ODESO LA, D. F., KULON, J., VERGHESE, S., PARTLOW, A. Y GIBSON, C., *Smart Sensing Chairs for Sitting Posture Detection, Classification, and Monitoring: A Comprehensive Review*, *Sensors*, vol. 24, 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s24092940>.
- [6] Amazon.es, *Sensor de presión MD30-60 de 0 a 30 kg, 30 mm de diámetro*, disponible en: <https://www.amazon.es/dp/B07PY443HS>, consultado el 26 de mayo de 2025.
- [7] , LÓPEZ, V. , LLAMOC CA, P. Y ČUKIĆ, M., *Signal Encoding of a Piezoelectric Sensor Grid for Fuzzy Motor Activity Analysis in Mental Health*, *Proceedings of the 2025 Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, *Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, 2025.
- [8] , JIMÉNEZ, Y., ESPINOSA, M. Y CUKIC, M., *Cloud aggregation of sensor data: an application on mood disorder analysis*, *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4. 0 & IoT)*, pp. 424–429, 2024.
- [9] , JIMÉNEZ, Y., ESPINOSA, M., LÓPEZ, V., LLAMOC CA, P., URGELÉS, D. Y GUEVARA, C. *Detection of Risk States in Emotional Disorders*, *18th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE 2023)*, Fuzhou, China, 2023
- [10] SHUKOR, A. Z. H., NATRAH, N. A., AFIQ, M. A., JAMALUDDIN, M. H., ABD GHANI, Z., MOHD SHAH, H. N. Y AB RASHID, M. Z., *Analysis of Sitting Posture Recognition using Pressure Sensors*, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 10, no. 2-6, pp. 53–57, 2018.

- [11] YANG, Y. Y ZHOU, Z., *Analysis of the Characteristics of Piezoelectric Sensor and Research of Its Application*, Proceedings of the 2016 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016), pp. 256–259, 2016.
- [12] ZALAZAR, M. A. Y GUARNIERI, F. A., *Análisis y evaluación del comportamiento de sensores piezoeléctricos*, Mecánica Computacional, Vol. XXIX, págs. 6665–6684, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Buenos Aires, 2010.