UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA, CIENCIA Y COMPUTACIÓN (STEAM)

Ingeniería en Sistemas Industriales con Mención en Electrónica y Automática

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño e Implementación de un Nodo IoT Periférico para la Monitorización Industrial, Seguridad y Analítica de Negocio en Máquinas de Vending

Alumno: D. JOSÉ JAVIER ALMENDROS CAÑADA

Director: D. GUSTAVO BERMEJO MARTÍN

JUNIO 2026

TÍTULO: Diseño e Implementación de un Nodo IoT Periférico para la Monitorización Industrial, Seguridad y Analítica de Negocio en Máquinas de Vending

AUTOR: José Javier Almendros Cañada

DIRECTOR DEL PROYECTO: Gustavo Bermejo Martín

FECHA: 3 de Junio de 2026

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado describe el diseño, desarrollo e implementación de un nodo periférico de Internet de las Cosas (IoT) orientado a la monitorización industrial y la analítica de negocio en máquinas de distribución automática (vending). El núcleo de la arquitectura consta de un microcontrolador de doble núcleo programado bajo un sistema operativo de tiempo real, el cual gestiona de forma concurrente la telemetría multisensorial, el control logístico y la seguridad pasiva del activo. Para la captura de las métricas financieras, el dispositivo realiza una escucha pasiva no invasiva sobre el bus de comunicaciones industrial de la máquina. Asimismo, la seguridad perimetral se monitoriza mediante sensores de impacto y de apertura del chasis; ante cualquier incidencia, el sistema captura evidencias fotográficas y las transmite de forma prioritaria a través de un canal de mensajería encriptado. Para asegurar que no se pierda ningún dato y que todo quede guardado en un mismo lugar, se ha creado un código personalizado que no necesita un servidor físico para funcionar. Este programa recibe las alertas de la máquina al instante y las apunta de forma automática y ordenada en una base de datos tabular. Finalmente, el proyecto explota esta base de datos mediante un cuadro de mando interactivo de Business Intelligence, consolidando indicadores clave de rendimiento comercial, patrones de rentabilidad y auditorías logísticas. Los ensayos realizados validan la viabilidad técnica, el rendimiento temporal y la alta escalabilidad comercial de la solución, optimizando costes operativos y de mantenimiento.

Palabras clave: Internet de las Cosas (IoT), monitorización industrial, analítica de negocio, microcontrolador de doble núcleo, sistema operativo de tiempo real, seguridad pasiva, base de datos tabular, Business Intelligence.

ABSTRACT

This Bachelor's Thesis describes the design, development, and implementation of an Internet of Things (IoT) peripheral node oriented towards industrial monitoring and business analytics in automatic dispensing machines (vending). The core of the architecture consists of a dual-core microcontroller programmed under a real-time operating system, which concurrently manages multisensory telemetry, logistical control, and the passive security of the asset. For financial metrics acquisition, the device performs non-invasive passive listening on the machine's industrial communications bus. Furthermore, perimeter security is monitored through impact and chassis-opening sensors; in the event of any incident, the system captures photographic evidence and transmits it with high priority through an encrypted messaging channel. To ensure that no data is lost and that everything is stored in one single place, a custom code has been created that does not require a physical server to operate. This program receives the machine's alerts instantly and logs them automatically and orderly into a tabular database. Finally, the project leverages this database through an interactive Business Intelligence dashboard, consolidating key commercial performance indicators, profitability patterns, and logistical audits. The trials carried out validate the technical feasibility, time performance, and high commercial scalability of the solution, optimizing both operational and maintenance costs.

Keywords: Internet of Things (IoT), industrial monitoring, business analytics, dual-core microcontroller, real-time operating system, passive security, tabular database, Business Intelligence.

Índice

RESUMEN....3
ABSTRACT....4
Capítulo 1. Introducción y objetivos....11
1.1. Introducción y Planteamiento del Problema....11
1.2. Motivación....12
1.3. Justificación y Ventajas Competitivas de la Solución....14
1.3.1. Dimensión Técnica: Del Aislamiento del Bus al Determinismo Concurrente....14
1.3.2. Dimensión Operativa: De la Logística Estocástica a las Rutas Dirigidas por Datos....14
1.3.3. Dimensión de Negocio: De la Pérdida de Clientes a la Maximización del Uptime y Mantenimiento Predictivo....15
1.4. Objetivos....15
1.5. Alcance del Proyecto....16
1.6. Viabilidad, Sostenibilidad e Impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible....17
1.6.1. Producción y Consumo Responsables (Meta 12.3 y Meta 12.5)....17
1.6.2. Acción por el Clima (Meta 13.2 - Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero)....17
Capítulo 2. Marco Teórico y Estado del Arte....19
2.1. El Sector del Vending y el Estándar de Comunicación MDB/ICP....19
2.1.1. Origen y Evolución del Protocolo Multi-Drop Bus....19
2.1.2. Arquitectura Maestro-Esclavo y Niveles Lógicos de Señal....20
2.1.3. Importancia del Aislamiento Galvánico en Entornos Industriales....20
2.2. Análisis Crítico de Soluciones de Telemetría Existentes....21
2.2.1. Innovaciones en Métodos de Pago y Telemetría....21
2.2.2. Matriz Comparativa de Especificaciones Técnicas....22
2.3. Análisis Estratégico y Potencial del Mercado de la Distribución Automática....23
2.3.1. Macromagnitudes del Sector a Nivel Europeo y Nacional....23
2.3.2. La Problemática del Parque Obsoleto y la Oportunidad del Retrofitting....24
2.4. Análisis del Coste de Inactividad y Modelado de Pérdida de Clientes....24
2.4.1. Cuantificación Financiera del Fallo en Tiempo Real....25
2.5. Paradigma de Sistemas Operativos en Tiempo Real (RTOS) y Procesamiento Simétrico....25
2.5.1. Limitaciones del Bucle Secuencial Clásico....26
2.5.2. Arquitectura de Procesamiento Simétrico de Doble Núcleo....26
2.5.3. Fundamentos de FreeRTOS: Planificación por Prioridades y Asignación de Memoria....27
2.6. Protocolos de Comunicación IoT y Arquitecturas Cloud....27
2.6.1. El Protocolo MQTT: Filosofía de Publicación/Suscripción....28
2.6.2. Paradigma de Computación Sin Servidor (Serverless Architecture) y Webhooks....28

2.7. Inteligencia de Negocio en la Industria 4.0 29
2.7.1. El Proceso de Extracción, Transformación y Carga 29
2.8. Aspectos Éticos, Legales y de Seguridad (RGPD) 31
Capítulo 3. Desarrollo técnico y diseño del sistema 32
3.1. Arquitectura General del Sistema 32
3.2. Diseño e Ingeniería del Hardware 33
3.2.1. Unidad Central de Procesamiento y Captura Óptica: Módulo Freenove ESP32-S3-WROOM con Sensor OV2640 33
3.2.1.1. Justificación Técnica del Módulo ESP32-S3-WROOM-1 33
3.2.1.2. Justificación Técnica del Sensor de Imagen OV2640 34
3.2.2. Subsistema de Alimentación: Convertidor Reductor Conmutado (Buck) de 5V 35
3.2.2.1. Justificación Crítica: Convertidor Conmutado Buck frente a Regulación Lineal 36
3.2.2.2. Componentes Críticos del Circuito Buck e Inmunidad al Ruido 37
3.2.3. Subsistema de Aislamiento Galvánico y Acoplamiento de Datos: El Optoacoplador 38
3.2.3.1. Principio de Operación y Arquitectura del Aislamiento 38
3.2.3.2. Justificación Crítica de la Selección del Optoacoplador: 6N137 frente a PC817 39
3.2.4. Subsistema de Seguridad y Detección de Impactos: Acelerómetro Triaxial ADXL345 40
3.2.4.1. Principio de Funcionamiento del Sensor 40
3.2.4.2. Justificación de la Elección del Componente 40
3.2.4.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending 41
3.2.5. Subsistema de Detección de Presencia: Sensor PIR 42
3.2.5.1. Principio de Funcionamiento del Sensor PIR 43
3.2.5.2. Justificación de la Elección del Componente frente a Alternativas 44
3.2.5.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending 44
3.2.6. Subsistema de Monitorización Térmica: Sensor Digital Dallas DS18B20 45
3.2.6.1. Principio de Funcionamiento del Sensor 45
3.2.6.2. Justificación de la Elección del Componente 46
3.6.2.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending 47
3.2.7. Subsistema de Supervisión Estructural y Control de Entregas: Sensores de Contacto Magnético Reed 48
3.2.7.1. Principio de Funcionamiento del Interruptor Reed 48
3.2.7.2. Justificación de la Elección del Componente 49
3.2.7.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación Diferenciada 50
3.2.8. Subsistema de Detección de Incidencias Logísticas: Sensor Óptico de Atasco Infrarrojo 51
3.2.8.1. Principio de Funcionamiento del Sensor Óptico 51
3.2.8.2. Justificación de la Elección del Componente 52
3.2.8.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending 53
3.2.9. Subsistema de Telemetría Industrial: Interfaz de Comunicación del Bus MDB 54
3.2.9.1. Principio de Funcionamiento y Capa Física del Bus MDB 54

3.2.9.2. Justificación de la Implementación de Hardware y Lógica de Adaptación.....55
3.2.9.3. Viabilidad e Impacto del Firmware de Escucha en FreeRTOS.....55
3.2.10. Metodología de Ingeniería Inversa mediante Sniffing y Lógica de Captura de Ventas 56
3.2.10.1. Fase de Experimentación y Sniffing del Bus MDB.....56
3.2.10.2. Gestión de Inventario Global y Control de Variación de Existencias..... 57
3.2.11. Esquema de Interconexiones y Distribución de Pines (Pinout).....58
3.2.12. Cumplimiento Normativo, Privacidad por Diseño y Marco Legal (RGPD)..... 59
3.2.12.1. Principio de Limitación de la Finalidad y Minimización de Datos.....60
3.2.12.2. Seguridad en la Transmisión.....60
3.2.12.3. Requisitos Operativos en el Punto de Venta.....60
Capítulo 4. Integración Cloud y Capa de Inteligencia de Negocio.....62
4.1. Arquitectura de Comunicaciones e Internet de las Cosas (IoT).....62
4.1.1. Protocolo MQTT y Conectividad con el Bróker Adafruit IO.....62
4.1.2. Implementación de la Capa de Notificaciones de Emergencia: API de Telegram..... 64
4.1.2.1. Configuración de la Infraestructura de Telegram: Creación del Bot y Obtención del Chat ID.....65
4.2. Persistencia y Centralización del Repositorio de Datos..... 67
4.2.1. Desarrollo de la Pasarela de Persistencia mediante Google Apps Script..... 67
4.3. Desarrollo del Cuadro de Mando..... 69
4.3.1. Modelado de Datos y Proceso ETL en Power BI.....69
4.3.2. Diseño de Indicadores Clave de Rendimiento y Paneles Visuales.....70
4.3.2.1. Tarjetas de Visualización de Estado Absoluto.....70
4.3.2.2. Selector de Intervalo Temporal..... 70
4.3.2.3. Gráfico de Anillo..... 71
4.3.2.4. Gráficos de Distribución Temporal y Análisis de Métricas Cruzadas.....71
Capítulo 5: Desarrollo del firmware y lógica de control.....73
5.1. Arquitectura Multihilo basada en FreeRTOS y Distribución de Núcleos.....73
5.2. Algoritmo de Interceptación y Purga del Bus MDB..... 74
5.3. Control de Periféricos y Gestión de Seguridad..... 76
5.3.1. Filtro Anti-Rebotes Temporal para la Seguridad de la Puerta..... 76
5.3.2. Procesamiento Vectorial Espacial y Bloqueo de Impactos.....77
5.3.3. Control Logístico de Presencia y Retención del Sensor PIR.....78
5.4. Integración y Comunicación con APIs Cloud.....79
5.4.1. Arquitectura de Sincronización IoT mediante MQTT..... 79
5.4.2. Pasarela Serverless sin Servidor Dedicado.....80
5.4.3. Flujo de Transferencia Multimedia en ráfaga.....81
5.5. Algoritmo de Muestreo de Temperatura Dinámica.....82
Capítulo 6: Pruebas, validación y resultados..... 84
6.1. Protocolo de Pruebas en Entorno de Laboratorio..... 84
6.1.1. Validación del Lazo de Control Industrial..... 84

6.1.2. Ensayos de Robustez de la Red Multisensorial y Alertas....85
6.2. Análisis de Rendimiento y Latencias del Sistema....86
6.2.1. Tiempo de Respuesta en Canales de Alerta Crítica....86
6.2.2. Latencia de Persistencia de Eventos....86
6.3. Discusión de Resultados y Viabilidad del Prototipo....87
Capítulo 7: Presupuesto y estudio de viabilidad económica....88
7.1. Coste Inicial de Desarrollo....88
7.2. CAPEX por Máquina....89
7.3. OPEX Recurrente....90
7.4. Viabilidad Comercial: Determinación del Precio de Venta al Público....91
7.5. Análisis de Viabilidad y Escalabilidad Industrial....91
7.5.1. El Coste de la Inactividad....92
7.5.2. Optimización Económica y Reducción del OPEX Técnico....92
7.6. Análisis de Retorno de Inversión y Optimización del Flujo de Caja Corporativo....93
7.6.1. Parámetros Financieros de Partida y Coste de Despliegue....93
7.6.2. Cuantificación de Ahorros Operativos Anuales (OPEX)....94
7.6.3. Recuperación de Ingresos Comerciales por Reducción de Downtime....94
7.6.4. Evaluación del Retorno de Inversión y Periodo de Amortización....95
Capítulo 8: Conclusiones y líneas futuras....96
8.1. Conclusiones Generales....96
8.2. Integración de Conocimientos Competenciales del Grado....97
8.3. Líneas Futuras de Desarrollo....98
ANEXO I....101
ANEXO II....102
ANEXO III....103
ANEXO IV....104
ANEXO V....105
ANEXO VI....106
ANEXO VII....107
ANEXO VIII....108
ANEXO IX....110
ANEXO X....111
BIBLIOGRAFÍA....118

Índice de Figuras

Figura 1: Logo de la empresa Nayax..... 22
Figura 2: Logo de la empresa Televend.....22
Figura 3: Logo empresa Cantaloupe..... 22
Figura 4: Gráfico proceso de Extracción, Transformación y Carga..... 30
Figura 5: Esquema Arquitectura General del Sistema.....32
Figura 6: ESP32-S3 WROOM Feenove.....34
Figura 7: Esquema Pinout de la placa ESP32-S3 WROOM de FREENOVE..... 34
Figura 8: Módulo OV2640.....35
Figura 9: Convertidor Buck LM2596HV.....36
Figura 10: Esquema convertidor Buck..... 37
Figura 11: Esquema optoacoplador..... 38
Figura 12: Optoacoplador 6N137.....39
Figura 13: Módulo ADXL345..... 42
Figura 14: Esquema funcionamiento sensor PIR.....43
Figura 15: Sensor PIR HC-SR501.....45
Figura 16: Esquema conexión sensor DS18B20..... 47
Figura 17: Sonda de temperatura DS18B20.....48
Figura 18: Esquema funcionamiento sensor magnético.....49
Figura 19: Sensor magnético..... 51
Figura 20: Esquema funcionamiento sensor E18-D80NK..... 52
Figura 21: Sensor E18-D80NK..... 53
Figura 22: Esquema eléctrico.....59
Figura 23: Ejemplo de colocación de cartel de videovigilancia en máquina.....61
Figura 24: Feeds creados en Adafruit IO.....63
Figura 25: Dashboard creado en Adafruit IO..... 63
Figura 26: Chat de telegram donde se envían las imágenes.....66
Figura 27: Código en Apps Scripts.....68
Figura 28 Tabla de Google Sheets donde se almacenan los datos.....68
Figura 29: Dashboard en Power BI.....72

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparativa Vending tradicional frente a la solución propuesta.....13
Tabla 2: Comparativa soluciones comerciales con el prototipo propuesto. Elaboración propia..... 23
Tabla 3: Guía conexión de los componentes con la ESP32.....58
Tabla 4: Coste inicial de desarrollo..... 88
Tabla 5: CAPEX por máquina.....89

Capítulo 1. Introducción y objetivos

En este primer capítulo se establecen las bases del proyecto, definiendo el contexto actual del sector del vending y las razones técnicas y económicas que justifican el desarrollo de este sistema. A continuación, se detallan los objetivos que se pretenden alcanzar, tanto a nivel general como específico, y se describe la metodología de trabajo seguida para garantizar el éxito del diseño y la implementación del nodo inteligente basado en el ESP32-S3.

1.1. Introducción y Planteamiento del Problema

El sector de la distribución automática mediante máquinas expendedoras (vending) se encuentra inmerso en un proceso estratégico de transformación digital. Tradicionalmente, la gestión operativa de estos activos distribuidos geográficamente ha sufrido de una problemática crítica: la opacidad absoluta del punto de venta. En el modelo analógico convencional, las máquinas operan como unidades aisladas, lo que significa que la empresa operadora carece de visibilidad en tiempo real sobre los eventos mecánicos, las fluctuaciones ambientales o el comportamiento comercial de los usuarios en el entorno físico.

Esta falta de información estructurada degrada severamente los márgenes de beneficio de las organizaciones debido a tres factores operativos:

- **Logística reactiva e ineficiente:** Las rutas de reposición se planifican en base a calendarios estáticos o estimaciones empíricas. Esto deriva en desplazamientos innecesarios para inspeccionar máquinas con stock suficiente o, en el escenario opuesto, en desabastecimientos prolongados en canales de alta demanda, incurriendo en un elevado coste de oportunidad.

- **Vulnerabilidad ante mermas y vandalismo:** Incidencias críticas como el atasco físico de un producto en las espirales, fallos térmicos en el módulo de refrigeración que comprometen la cadena de frío, o intentos de sabotaje estructural no se detectan de forma inmediata, lo que prolonga el tiempo de inactividad de la máquina y degrada la experiencia del cliente.

- **Inexistencia de analítica comercial en el Edge:** Las decisiones de surtido de producto y fijación de precios se toman sin disponer de métricas precisas sobre la tasa de conversión por afluencia (público expuesto frente a ventas reales) o mapas de calor de demanda según franjas horarias.

Esta investigación resuelve este déficit mediante el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de soporte a la decisión basado en arquitectura IoT y capas analíticas de Inteligencia de Negocio. A través de un nodo inteligente de bajo coste gobernado por el microcontrolador de doble

núcleo ESP32-S3, se interceptan las tramas de venta, se audita el entorno sensorial del activo y se transforma el dato bruto periférico en indicadores clave de rendimiento visuales y accionables para la gerencia.

1.2. Motivación

Históricamente, las máquinas expendedoras se han concebido como unidades aisladas en campo, cuya única interacción con el operador se limita a las visitas físicas programadas para las tareas de reposición de productos y recaudación económica. Este aislamiento tecnológico introduce severas ineficiencias críticas que comprometen la rentabilidad y la sostenibilidad operativa de las empresas del sector.

La motivación principal de este Trabajo de Fin de Grado nace de la necesidad de resolver estas ineficiencias en un entorno operativo real, tomando como escenario experimental de estudio una empresa familiar dedicada de manera directa a la explotación y gestión de máquinas expendedoras.

El conocimiento detallado y de primera mano de la operativa diaria de este negocio ha permitido identificar una triple problemática estructural, tanto a nivel comercial como técnico:

1. **Opacidad absoluta del punto de venta en tiempo real**: La empresa carece de visibilidad sobre el estado interno de los activos. Fenómenos críticos como la caída de la red eléctrica en el establecimiento, fallos de alimentación en los monederos, o atascos físicos en las trampillas de entrega de producto no son detectados de manera automática. Esto provoca situaciones donde una máquina puede permanecer fuera de servicio durante todo un fin de semana, deteniendo la generación de ingresos de forma indefinida hasta el lunes siguiente.

2. **Logística ineficiente y rutas de transporte "a ciegas":** Al no disponer de un registro remoto del stock en cada canal, el personal debe planificar las rutas de suministro basándose en estimaciones estadísticas o frecuencias temporales fijas. Esto genera dos escenarios altamente ineficientes: furgonetas de reposición que viajan a localizaciones lejanas para abastecer máquinas que aún tienen suficiente inventario (desperdiciando combustible y tiempo), o bien retrasos en la atención que derivan en la rotura de stock de los productos de mayor rotación, lo que causa el enfado del cliente.

3. **Vulnerabilidad ante averías térmicas y vandalismo**: El desabastecimiento o la indisponibilidad técnica del activo no solo destruye el margen de beneficio directo de la jornada, sino que genera un malestar al cliente lo que le puede hacer plantearse a retirar las máquinas de la ubicación. Asimismo, las averías en el compresor del compartimento de refrigeración provocan desalineaciones térmicas que ponen en riesgo la seguridad alimentaria de productos perecederos, obligando a desechar lotes enteros. A esto se suma la

imposibilidad de reaccionar de forma activa ante ataques vandálicos o aperturas forzadas del chasis metálico para el robo de la recaudación.

Ante esta situación, el coste de "no actuar" o mantener el modelo cerrado actual se traduce en pérdidas económicas acumuladas considerables y un desgaste en la confianza del cliente final. El despliegue de soluciones de telemetría existentes en el mercado no constituye una alternativa viable para la empresa familiar debido a sus elevados costes de adquisición de hardware y, sobre todo, a los costes mensuales de suscripción, los cuales absorben el estrecho margen neto de los productos.

Por consiguiente, este proyecto se justifica por la necesidad de diseñar e implementar una solución de hardware y software propia, de bajo coste, capaz de interceptar de forma no invasiva las comunicaciones del bus industrial MDB y digitalizar por completo el activo. La ventaja competitiva, técnica y operativa que introduce esta solución frente al estado actual de la empresa familiar se sintetiza en la siguiente matriz de impacto:

Dimensión de Impacto	Estado Actual de la Empresa	Estado Futuro con la Solución Implementada
Técnica	• Aislamiento absoluto del bus de datos MDB • Diagnóstico de averías presencial y tardío	• Interceptación digital continua y segura. • Monitorización multisensorial en tiempo real.
Operativa	• Planificación logística fija y rutas "a ciegas". • Carga sobredimensionada de stock en vehículos. • Dependencia del aviso telefónico del cliente para detectar fallos.	• Logística dirigida basada en inventario cloud dinámico. • Eliminación de desplazamientos redundantes. • Gestión de incidencias técnica proactiva e inmediata.
Negocio	• Pérdida de ventas por rotura de stock de alta rotación. • Mermas de alimentos por fallos ocultos de frío. • Indefensión ante robos y vandalismo en campo.	• Maximización de la tasa de disponibilidad. • Mantenimiento predictivo mediante el gradiente térmico. • Seguridad perimetral multimedia con evidencias en Telegram.

Tabla 1: Comparativa Vending tradicional frente a la solución propuesta

La democratización y universalización de esta tecnología mediante hardware accesible permite que una pequeña empresa familiar adquiera capacidades analíticas de una gran corporación de la Industria 4.0, garantizando la soberanía de datos y la sostenibilidad del modelo de negocio a largo plazo.

1.3. Justificación y Ventajas Competitivas de la Solución

Para comprender el impacto real del sistema desarrollado, es importante analizar cómo la introducción del nodo IoT periférico transforma las deficiencias tecnológicas y de gestión actuales en ventajas competitivas estratégicas. A continuación, se desglosa el análisis de la solución desde una triple perspectiva fundamental en la ingeniería de proyectos: técnica, operativa y de negocio.

1.3.1. Dimensión Técnica: Del Aislamiento del Bus al Determinismo Concurrente

- **La situación actual:** Las máquinas expendedoras de la empresa familiar operan con placas de control locales que procesan internamente el bus MDB, pero carecen de interfaces de red orientadas a la operabilidad industrial. Al no haber telemetría no se puede saber si hay algún error en la máquina. El diagnóstico de cualquier avería es puramente presencial, ciego y reactivo, obligando al técnico a desplazarse con instrumentación básica al punto de venta para solucionar el fallo.

- **La mejora de la solución propuesta:** El nodo periférico rompe este aislamiento mediante una arquitectura de sniffing digital continuo, acoplada ópticamente para no interferir en las líneas críticas de transmisión de datos. Al emplear el ESP32-S3 bajo la técnica de FreeRTOS, se dedica un núcleo exclusivo con la máxima prioridad de hardware a la escucha de la UART a 9 bits del bus MDB. Esto garantiza que no se pierdan bytes, impidiendo que las latencias inherentes a las transmisiones Wi-Fi o a la captura multimedia en el Core 1 corrompan el procesamiento de los estados del bus de vending. Las averías ya no se infieren, se capturan y notifican en segundos con marcas de tiempo precisas.

1.3.2. Dimensión Operativa: De la Logística Estocástica a las Rutas Dirigidas por Datos

- **La situación actual:** La planificación de las rutas de abastecimiento y mantenimiento se rigen bajo un modelo de probabilidad o de frecuencias temporales rígidas. El reponedor carga el vehículo con un inventario sobredimensionado y genérico para cubrir cualquier posible desabastecimiento "estimado". Esto deriva en desplazamientos redundantes e ineficientes que incrementan de manera severa el coste en combustible, el desgaste de la flota y el coste de oportunidad del personal, el cual pasa gran parte de su jornada conduciendo hacia máquinas que no requerían atención inmediata.

- **La mejora de la solución propuesta:** La implementación del nodo introduce un modelo de logística dirigida y predictiva. Al captar cada evento de venta de forma asíncrona en los repositorios en la nube, la gerencia dispone del inventario en tiempo real de la máquina. Operativamente, esto reduce drásticamente el kilometraje innecesario y transforma una actividad tradicionalmente caótica en una cadena de suministro ágil gobernada por datos masivos.

1.3.3. Dimensión de Negocio: De la Pérdida de Clientes a la Maximización del Uptime y Mantenimiento Predictivo

- **La situación actual:** Desde la perspectiva de negocio, el vending tradicional asume un coste oculto devastador: la inactividad. Si una máquina sufre una rotura de stock de un artículo estrella, una desconexión por vandalismo o una avería en el compresor que rompe la cadena de frío, el activo permanece inoperativo y generando pérdidas. El coste no es solo la facturación no percibida, sino la pérdida de lealtad comercial: el usuario que encuentra la máquina inoperativa o con el producto agotado experimenta frustración y migra permanentemente sus hábitos de consumo hacia la competencia más cercana.

- **La mejora de la solución propuesta:** El proyecto altera radicalmente el flujo económico incrementando la rentabilidad neta mediante dos mecanismos: la minimización de la inactividad y el mantenimiento predictivo. Ante cualquier intrusión o anomalía las notificaciones por Telegram permiten corregir el problema en minutos, no en días. Comercial y económicamente, conocer la relación exacta entre el tráfico peatonal y las ventas permiten calcular la Tasa de Conversión Comercial por franjas horarias. Esto dota a la empresa de la capacidad analítica para alterar el catálogo de productos o modificar los precios dinámicamente según la demanda real de cada localización.

1.4. Objetivos

Objetivo general:

Diseñar, construir e implementar un ecosistema tecnológico integrado de IoT y *Business Intelligence* basado en el microcontrolador ESP32-S3 para la monitorización remota, la gestión automatizada de inventario en tiempo real y la optimización de la seguridad física en una máquina expendedora convencional.

Objetivos Específicos:

- **Desarrollar una interfaz de captura industrial robusta:** Configurar un canal de adquisición asíncrono para interceptar y decodificar las tramas del protocolo Multi-Drop Bus (MDB) a 9600 baudios, permitiendo contabilizar de forma exacta las transacciones lógicas de venta y sincronizar el stock sin alterar la electrónica nativa del controlador de la máquina.

- **Implementar un sistema de supervisión sensorial preventivo:** Integrar una red de sensores físicos encargados de auditar la seguridad estructural, la disponibilidad logística y el comportamiento térmico del módulo de refrigeración mediante buses digitales de precisión

- **Establecer una arquitectura de comunicación eficiente en la nube:** Programar un flujo de transferencia de datos bidireccional bajo el protocolo ligero MQTT, garantizando el envío inmediato de alertas críticas hacia repositorios en la nube y la recepción de comandos virtuales de gestión de inventario.

- **Desarrollar la capa analítica de Inteligencia de Negocio:** Diseñar un cuadro de mando ejecutivo interactivo en la plataforma Power BI que explote los eventos históricos consolidados, aislando el ruido físico en el origen y transformando los datos crudos del punto de venta en indicadores clave de rendimiento (KPIs) operativos y de mantenimiento predictivo.

1.5. Alcance del Proyecto

El alcance de este proyecto engloba el diseño completo del ciclo de vida del dato, desde el fenómeno físico en la máquina expendedora hasta su presentación analítica en la capa de negocio. El desarrollo se delimita en las siguientes fases funcionales:

- **Fase de Firmware y Computación Periférica:** Programación del ESP32-S3 en C++ utilizando técnicas de control de tiempos no bloqueantes mediante *millis()* y gestión de subtareas asíncronas para el bus MDB, blindando la captura de eventos frente a las latencias de la red Wi-Fi.

- **Fase de Integración Cloud e Inteligencia de Negocio:** Configuración de la base de datos intermedia basada en hojas de cálculo automatizadas y el diseño de la lógica de extracción y modelado de datos para el Dashboard de Power BI.

Queda fuera del alcance de este proyecto el desarrollo físico de pasarelas de pago bancario o la modificación de los algoritmos internos de dispensación de la máquina de vending, operando el sistema desarrollado de manera estrictamente no intrusiva.

1.6. Viabilidad, Sostenibilidad e Impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El diseño e implementación del nodo IoT periférico no solo se justifica desde una perspectiva técnica y de viabilidad financiera, sino que se alinea de manera estricta con los criterios de sostenibilidad ambiental, eficiencia energética y responsabilidad social corporativa. La transición de la empresa familiar desde un modelo de gestión estocástico y reactivo hacia una operativa dirigida por datos masivos en tiempo real permite mitigar los impactos ambientales negativos inherentes a la logística del vending tradicional.

De manera específica, el proyecto genera un impacto positivo medible sobre tres de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas:

1.6.1. Producción y Consumo Responsables

La monitorización térmica continua mediante el sensor digital de temperatura en el compartimento mecánico de las máquinas expendedoras incide de manera directa en la reducción del desperdicio alimentario. En el modelo operativo previo de la empresa, una avería oculta en el compresor que provocase la pérdida de la cadena de frío durante un fin de semana obligaba a desechar el 100% del inventario perecedero. La capacidad de emitir alertas tempranas de riesgo térmico permite ejecutar mantenimientos correctivos inmediatos, salvaguardando la integridad de los alimentos. Asimismo, el desarrollo del hardware bajo una arquitectura de modernización evita la obsolescencia prematura de activos industriales de alto coste, reduciendo drásticamente la generación de residuos tecnológicos y maximizando el ciclo de vida de los componentes electrónicos y electromecánicos ya instalados.

1.6.2. Acción por el Clima

El impacto ambiental más significativo y cuantificable del proyecto radica en la optimización de la cadena de suministro y la reestructuración logística de las rutas de transporte. Para evaluar la mitigación de la huella de carbono en la empresa, se establece una estimación analítica basada en los parámetros operativos reales de la flota de vehículos comerciales ligeros (motores diésel Euro 6, con un consumo medio homologado de 7.5litros/100km y unas emisiones específicas medias de 198 g CO2\ km):

- **Escenario Base (Tradicional):** La planificación de rutas a ciegas y la carga sobredimensionada de stock estocástico obligan a realizar desplazamientos diarios fijos, estimando un recorrido medio acumulado de 12,000km anuales por vehículo para el abastecimiento y supervisión del

parque de máquinas. Esto se traduce en una huella de carbono de 2.376 toneladas de CO2 al año por vehículo comercial.

- **Escenario Optimizado**: La disponibilidad de los datos de inventario y rotura de stock en tiempo real permite consolidar la logística dirigida, eliminando por completo los viajes redundantes hacia máquinas con suficiente stock remanente. Los datos experimentales del despliegue piloto justifican una reducción mínima del 30% en los kilómetros totales recorridos, contrayendo el kilometraje anual a 8,400km.

Esta optimización operativa se traduce en un ahorro neto directo de 270 litros de combustible diésel por vehículo al año. En términos de impacto atmosférico, la implantación del nodo IoT periférico logra una reducción de 712.8 kg de CO2 anuales por cada unidad de transporte. A nivel de escala corporativa, este indicador cuantitativo valida la sostenibilidad del proyecto como una herramienta eficaz para la descarbonización de los servicios de distribución urbana.

Capítulo 2. Marco Teórico y Estado del Arte

En este capítulo se realiza un análisis exhaustivo del ecosistema tecnológico actual en el sector del *vending*. Se examinan las innovaciones que están transformando las máquinas expendedoras de simples puntos de venta mecánicos a nodos inteligentes de servicios digitales, justificando la necesidad de una solución integrada como la propuesta en este trabajo.

2.1. El Sector del Vending y el Estándar de Comunicación MDB/ICP

Para abordar el diseño de un nodo periférico de monitorización e interceptación de datos en entornos de distribución automática, es fundamental comprender los fundamentos tecnológicos que gobiernan la electrónica interna de estos activos. Históricamente, el sector del vending ha integrado una gran variedad de sistemas de pago y control electromecánico que requerían una unificación bajo una arquitectura común.

En este apartado se examina la evolución del mercado de la distribución automática hacia la estandarización digital y se analiza en profundidad el protocolo MDB, describiendo su arquitectura de comunicaciones, sus niveles lógicos de señal y los requerimientos críticos de aislamiento galvánico necesarios para garantizar la integridad del hardware de control frente a las interferencias industriales.

2.1.1. Origen y Evolución del Protocolo Multi-Drop Bus

El desarrollo de los sistemas de automatización en máquinas de distribución automática (vending) exigió la creación de un ecosistema que permitiera la operativa interna de los periféricos de diferentes fabricantes (monederos mecánicos, billeteros electrónicos y lectores de tarjetas de crédito) con la unidad central de procesamiento de la máquina, denominada formalmente VMC (Vending Machine Controller). Con este propósito, la National Automatic Merchandising Association (NAMA) y la European Vending & Coffee Service Association (EVA) consolidaron el estándar MDB/ICP (Multi-Drop Bus / Internal Communication Protocol).

Este protocolo de comunicaciones define tanto la capa física como la capa de enlace de datos, garantizando que cualquier periférico compatible pueda conectarse en cascada al mismo bus de control sin generar conflictos de direccionamiento ni incompatibilidades de hardware.

2.1.2. Arquitectura Maestro-Esclavo y Niveles Lógicos de Señal

A nivel de enlace, el bus MDB opera bajo una topología Maestro-Esclavo estricta y asíncrona. El VMC actúa como el único nodo Maestro del sistema, gobernando de forma centralizada el canal de comunicaciones a través de un proceso de consulta secuencial continuo (polling). Los periféricos de pago y telemetría actúan de forma pasiva como Nodos Esclavos; estos tienen prohibido iniciar una transmisión de datos hacia el bus de manera autónoma, limitándose exclusivamente a responder al Maestro cuando este invoca su dirección lógica específica mediante comandos de lectura o escritura.

La comunicación serie se establece a una velocidad fija de 9600 baudios. Sin embargo, a diferencia de los protocolos de comunicación convencionales como el RS-232 o la UART estándar que operan con tramas de 8 bits, el estándar MDB introduce una modificación en la estructura de la palabra binaria, configurando tramas de 9 bits de datos:

- **El noveno bit (Mode Bit):** Cuando el Maestro (VMC) transmite una dirección para seleccionar a un esclavo, fija este noveno bit a nivel alto (1). Por el contrario, cuando la trama contiene datos ordinarios o respuestas de control, el noveno bit se conmuta a nivel bajo (0). Esto permite que los esclavos mantengan sus búferes de recepción en reposo, despertando sus rutinas de software únicamente cuando se transmite un bit de dirección coincidente con su ID de hardware.

Físicamente, la capa de señal opera con un nivel de tensión de corriente continua fijado a 5 V.

2.1.3. Importancia del Aislamiento Galvánico en Entornos Industriales

Las máquinas expendedoras integran en su interior cargas de naturaleza fuertemente inductiva, tales como motores de corriente continua para el giro de las espirales mecánicas, actuadores para la devolución de monedas y compresores térmicos para los sistemas de refrigeración. Durante la conmutación y parada de estos componentes magnéticos, se produce el fenómeno físico de la fuerza contraelectromotriz, el cual inyecta ráfagas de transitorios de alta tensión, picos y ruido electromagnético (EMI) en las líneas comunes de alimentación y masa del chasis.

Si un microcontrolador de tecnología CMOS de bajo voltaje, como el ESP32-S3, se acoplara eléctricamente de forma directa al bus MDB, estas corrientes parásitas destruirían las uniones de silicio de sus pines GPIO por sobretensión. Por tanto, es imperativo diseñar una barrera de aislamiento galvánico. Esta técnica rompe la conexión física y el retorno de masa entre el circuito de potencia industrial de la máquina de vending y el circuito de control lógico del nodo IoT,

encapsulando la transferencia de la información digital de manera exclusiva a través de ondas de luz moduladas dentro de un optoacoplador.

2.2. Análisis Crítico de Soluciones de Telemetría Existentes

En la actualidad, el mercado del vending ofrece soluciones de telemetría comercial desarrolladas por grandes firmas tecnológicas (como Nayax o Televend). Estos sistemas consisten en pasarelas propietarias que se conectan al controlador de la máquina y transmiten datos de las transacciones a sus propios servidores en la nube.

Tras una evaluación técnica y económica de estas alternativas, se justifican las limitaciones que motivan el desarrollo de esta solución:

- **Dependencia de Proveedor:** Las soluciones comerciales son ecosistemas cerrados. Los datos en bruto no pertenecen al operador, sino a la empresa de telemetría, limitando la capacidad de exportar la información de forma nativa a herramientas personalizadas de Business Intelligence como Power BI.

- **Inviabilidad Económica para PYMEs:** Estas plataformas exigen un elevado coste de adquisición de hardware por cada máquina, sumado a contratos de mantenimiento y cuotas de suscripción mensuales recurrentes por el uso del software y las comunicaciones móviles. Para un operador de pequeña o mediana escala, estos costes fijos absorben el estrecho margen de beneficio por unidad de producto vendida.

- **Rigidez Sensorial:** Los terminales estándar del mercado están orientados exclusivamente al procesamiento de pagos y control de contabilidad. Carecen de la flexibilidad para integrar de forma simultánea sensores ambientales personalizados, sistemas de detección de atascos en el canal de caída o analítica de presencia peatonal en el mismo dispositivo.

2.2.1. Innovaciones en Métodos de Pago y Telemetría

El avance más visible se ha dado en la eliminación del efectivo. Empresas líderes han marcado el estándar:

- **Sistemas de Pago Contactless:** El lector Nayax Onyx es el referente actual, integrando pagos NFC y códigos QR en un solo dispositivo compacto. Consiste en un dispositivo cerrado que se conecta al bus de la máquina para autorizar transacciones bancarias, monitorizar las ventas generales y transmitir incidencias de stock mediante conexiones celulares.

Figura 1: Logo de la empresa Nayax

- **Telemetría en Tiempo Real:** Plataformas como Televend permiten a los operadores ver el estado de las bandejas desde un smartphone, reduciendo las visitas innecesarias en un 30%. Captura las transacciones del bus MDB y envía informes periódicos a un software centralizado de planificación, permitiendo a los operadores conocer las necesidades de reposición antes de salir de los almacenes.

Figura 2: Logo de la empresa Televend

- **Gestión de Inventario Dinámico:** El software de Cantaloupe (Seed Office) utiliza datos históricos para predecir cuándo una máquina de refrescos se quedará sin stock antes de que suceda.

Figura 3: Logo empresa Cantaloupe

2.2.2. Matriz Comparativa de Especificaciones Técnicas

Para justificar la propuesta de valor del nodo IoT desarrollado en este proyecto, se presenta una matriz de ingeniería que contrasta las capacidades de las soluciones comerciales frente al prototipo implementado:

Criterio Técnico / Económico	Soluciones Comerciales	Propuesta de Valor	Impacto de Ingeniería en el Proyecto
Tipo de Conexión MDB	Activa (Modifica e interviene pagos)	Pasiva (Sniffing No Invasivo)	Evita alterar las certificaciones de la máquina original.
Estructura de Costes	Mantenimiento Mensual Alto + Comisiones	Inversión Inicial Baja / Sin Comisiones	Maximiza la rentabilidad del operador a largo plazo.
Seguridad Física e Impactos	No disponible	Integrada (	Detección vectorial inmediata de vandalismo estructural.
Auditoría Multimedia	No disponible	Cámara OV2640 vía Telegram	Captura automática de evidencias ante intrusiones.
Telemetría Térmica	No disponible	Muestreo Dinámico	Mantenimiento predictivo del compresor de frío.
Explotación de Datos	Servidor Cerrado del Fabricante	Abierta (Power BI / Serverless)	Autonomía total para el análisis predictivo del negocio.

Tabla 2: Comparativa soluciones comerciales con el prototipo propuesto. Elaboración propia

2.3. Análisis Estratégico y Potencial del Mercado de la Distribución Automática

Para fundamentar la viabilidad comercial y el impacto a escala industrial del nodo IoT periférico desarrollado, es indispensable realizar un análisis cuantitativo del sector de la distribución automática. Este estudio de mercado permite dimensionar el volumen de activos susceptibles de ser integrados en el ecosistema de la Industria 4.0 y justifica la ventana de oportunidad económica para las soluciones de arquitectura abierta y bajo coste.

2.3.1. Macromagnitudes del Sector a Nivel Europeo y Nacional

De acuerdo con los últimos informes sectoriales publicados por la EVA (European Vending & Coffee Service Association), el mercado de la distribución automática en Europa se consolida como uno de los canales logísticos capilares más estables y con mayor densidad de activos.

- **El Mercado Europeo:** El parque total de máquinas expendedoras operativas en el continente europeo supera los 4.4 millones de unidades, gestionando un volumen superior a las 10.000 millones de transacciones anuales con una facturación global que sobrepasa los 16.000 millones de euros.

- **El Mercado en España:** Según los datos consolidados por ANEDA (Asociación Nacional Española de Distribuidores Automáticos), España se sitúa en el top 5 de los mercados europeos, con un parque instalado de aproximadamente 380.000 máquinas expendedoras. El sector en España da servicio diario a millones de usuarios en entornos corporativos, hospitalarios, educativos y de transporte público, generando una facturación anual que ronda los 1.200 millones de euros.

2.3.2. La Problemática del Parque Obsoleto y la Oportunidad del Retrofitting

A pesar de la magnitud financiera del sector, el análisis de mercado revela una asimetría tecnológica crítica que constituye el núcleo de la oportunidad de este proyecto: la obsolescencia conectiva del parque instalado.

Muchas de las máquinas de vending operativas en la actualidad carecen de cualquier tipo de conexión remota o sistema de telemetría activa. Estas máquinas (con una vida útil mecánica y estructural que supera fácilmente los 10 o 15 años) operan de forma aislada, procesando de manera local el bus MDB sin capacidad de reportar datos transaccionales, niveles de stock o fallos lógicos a la nube.

Ante este escenario, las empresas operadoras se enfrentan a una dualidad estratégica:

1. **Sustitución de Activos:** Adquirir máquinas expendedoras de nueva generación que incluyan sistemas nativos de telemetría. Esta opción presenta una viabilidad financiera prácticamente nula para las pequeñas y medianas empresas, ya que exige un gasto de capital inasumible (entre 4.000 € y 8.000 € por máquina nueva).

2. **Modernización Adaptativa**: Mantener el chasis y los sistemas de refrigeración o dispensación mecánica existentes, e implantar un dispositivo electrónico periférico que intercepte y digitalice la información del bus MDB.

2.4. Análisis del Coste de Inactividad y Modelado de Pérdida de Clientes

Para evaluar el impacto crítico que presentan las averías no detectadas en tiempo real dentro de la empresa, se ha desarrollado un modelo analítico basado en métricas reales de explotación. Este estudio desglosa el coste financiero invisible que asume la organización bajo el modelo tradicional, estructurándose en pérdidas directas por lucro cesante y la degradación del activo comercial.

2.4.1. Cuantificación Financiera del Fallo en Tiempo Real

Cuando una máquina expendedora sufre una incidencia crítica durante el fin de semana, el periodo medio de inactividad técnica se prolonga durante 60 horas consecutivas.

El coste económico directo por el cese de actividad de un único activo se calcula mediante la siguiente expresión analítica:

Coste inactividad = Tiempo inactividad X Demanda media X Valor venta media

Sustituyendo los parámetros operativos del escenario base:

Coste inactividad = 60 X 4 X 2,50 = 600 €

Este indicador demuestra que cada fin de semana que una máquina permanece inoperativa sin supervisión IoT, la empresa deja de ingresar 600.00 € de facturación directa por unidad. Si este escenario se repite únicamente 4 veces al año en el parque de máquinas, el coste acumulado por lucro cesante asciende a 2,400 €.

2.5. Paradigma de Sistemas Operativos en Tiempo Real (RTOS) y Procesamiento Simétrico

El desarrollo de sistemas embebidos de alta disponibilidad aplicados a la monitorización industrial exige una transición estructural desde las arquitecturas clásicas de programación secuencial hacia modelos de computación avanzados. La necesidad de gestionar simultáneamente variables de seguridad perimetral de respuesta inmediata junto con protocolos de comunicación inalámbricos que introducen latencias aleatorias hace inviable el uso de un bucle de control lineal único.

En este apartado se analizan las limitaciones de la programación convencional basada en el muestreo cíclico y se justifica, desde un punto de vista teórico, el uso de arquitecturas de procesamiento simétrico de doble núcleo gobernadas por un sistema operativo de tiempo real (FreeRTOS). Se desglosarán los mecanismos de planificación por prioridades y el aislamiento de memoria en la pila, pilares conceptuales necesarios para garantizar el determinismo y la estabilidad del firmware desarrollado.

2.5.1. Limitaciones del Bucle Secuencial Clásico

En el ámbito del diseño de sistemas embebidos tradicionales, la estructura de software más común se basa en el modelo de super-bucle secuencial único (arquitectura *bucle loop()*). En este esquema, el procesador ejecuta las instrucciones de forma estrictamente lineal, evaluando un sensor tras otro y ejecutando las rutinas de comunicación de manera consecutiva.

Aunque este enfoque es válido para aplicaciones sencillas, presenta deficiencias críticas en entornos industriales complejos debido al acoplamiento temporal de las tareas:

- **Pérdida de Eventos Asíncronos:** Si el procesador se encuentra ejecutando una subrutina que requiere un tiempo de espera elevado (como la espera de un paquete de red o la negociación de un cifrado web), el flujo de ejecución se detiene. Si durante ese lapso de congelación un usuario realiza una compra o se produce un impacto de vandalismo, el microcontrolador ignora el evento físico, provocando la pérdida de registros financieros o fallos en los sistemas de alarma.

- **Falta de Determinismo:** El tiempo que tarda el procesador en dar una vuelta completa al bucle varía constantemente en función de las condiciones del entorno (por ejemplo, si el sensor de temperatura se lee o no en ese ciclo). Esta fluctuación impide garantizar un tiempo de respuesta máximo constante ante eventos críticos de seguridad.

2.5.2. Arquitectura de Procesamiento Simétrico de Doble Núcleo

Para dar soporte a un sistema de tiempo real, el hardware debe proporcionar una infraestructura capaz de ejecutar tareas en paralelo. La arquitectura de Procesamiento Multisimétrico (SMP) dota al sistema de dos unidades de procesamiento independientes (núcleos) que comparten el mismo mapa de memoria interna de forma síncrona.

A nivel de hardware, esto transforma radicalmente la ejecución del firmware. En lugar de emular la multitarea intercalando ráfagas de reloj en una sola CPU, un sistema SMP permite la ejecución simultánea de dos flujos de instrucciones reales. Esto permite segmentar el hardware de manera que los procesos de comunicaciones (que introducen latencias) queden unidos en un núcleo, dejando el otro procesador completamente libre y dedicado a tareas de alta prioridad que exigen un determinismo absoluto.

2.5.3. Fundamentos de FreeRTOS: Planificación por Prioridades y Asignación de Memoria

Para gobernar el procesamiento simétrico y gestionar la concurrencia de forma eficiente, se integra un sistema operativo de tiempo real: FreeRTOS (Real-Time Operating System). A diferencia de los sistemas operativos convencionales enfocados en la equidad del tiempo de CPU (como Linux o Windows), un RTOS está diseñado para garantizar que las tareas críticas se ejecuten exactamente cuando se necesitan.

Los pilares teóricos de FreeRTOS que habilitan este comportamiento son:

- **Planificador Basado en Prioridades Apropiativas**: El núcleo de FreeRTOS asigna a cada hilo de ejecución un nivel de prioridad numérica. El planificador evalúa constantemente el estado del sistema; si una tarea de alta prioridad (como la escucha del bus MDB) requiere atención, el sistema operativo interrumpe de forma inmediata la ejecución de cualquier tarea de menor prioridad que se esté ejecutando, guarda su contexto en la memoria y le cede el control de la CPU. Este cambio de contexto se realiza en el orden de los microsegundos, asegurando una respuesta inmediata ante eventos críticos.

- **Aislamiento de Memoria mediante Pilas Estáticas**: Cada tarea instanciada en FreeRTOS cuenta con su propio bloque de memoria reservada de forma exclusiva, denominado pila o stack. Este aislamiento teórico es fundamental en ingeniería de software, ya que evita que el desbordamiento de variables o los cálculos pesados de una rutina orientada a la conectividad web corrompan o invadan los registros de memoria de las funciones de control local y lectura de sensores.

- **Mecanismos de Sincronización e Hilos Libres de Bloqueos:** El sistema operativo introduce funciones de retardo no bloqueantes (vTaskDelay). A diferencia de los retardos convencionales (delay), que congelan el reloj de la CPU desperdiciando ciclos de procesamiento, las instrucciones de FreeRTOS suspenden temporalmente la tarea actual y devuelven el control al planificador de forma inmediata. Esto permite que otras tareas secundarias aprovechen el procesador mientras la tarea principal espera a que transcurra el tiempo programado, optimizando la eficiencia global del firmware.

2.6. Protocolos de Comunicación IoT y Arquitecturas Cloud

El despliegue de una flota de nodos periféricos en el entorno industrial exige la selección de arquitecturas de red y protocolos de comunicación capaces de mitigar las restricciones de ancho de banda, garantizar la seguridad criptográfica de los datos en tránsito y minimizar el consumo de recursos de procesamiento en el hardware embebido.

2.6.1. El Protocolo MQTT: Filosofía de Publicación/Suscripción

Para la telemetría interactiva en tiempo real, el paradigma clásico de comunicación web basado en arquitecturas cliente-servidor mediante peticiones HTTP convencionales resulta ineficiente en sistemas embebidos. El protocolo HTTP requiere el establecimiento de una cabecera de texto pesada en cada petición y obliga al cliente a realizar consultas continuas para conocer el estado del servidor, lo que satura la pila de red del microcontrolador.

Para resolver esta ineficiencia, se utiliza el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT es un protocolo de mensajería ligero estructurado bajo una topología de Publicación/Suscripción.

La arquitectura teórica de MQTT se fundamenta en tres elementos clave:

- **El Bróker:** Actúa como un servidor intermediario centralizado encargado de gestionar el enrutamiento de los mensajes. No examina el contenido de la información, sino que distribuye las cargas útiles basándose en etiquetas de texto jerárquicas denominadas tópicos (topics o feeds).

- **Publicación:** Los nodos periféricos actúan como clientes que envían información hacia un tópico concreto en el bróker (por ejemplo, vending/nodo_01/temperatura). El tamaño de la cabecera de un paquete MQTT es de tan solo 2 bytes, lo que optimiza drásticamente el consumo de datos inalámbricos y agiliza el búfer de transmisión de la UART.

- **Suscripción e Hilos de Control:** Los clientes pueden suscribirse de forma asíncrona a feeds de control. Cuando el bróker detecta un cambio en ese tópico, lo empuja activamente hacia los clientes suscritos mediante eventos controlados. Esta característica es esencial para implementar funciones remotas, como el reinicio inalámbrico de variables de inventario o la actualización remota de parámetros del sistema desde interfaces de control centralizadas.

2.6.2. Paradigma de Computación Sin Servidor (Serverless Architecture) y Webhooks

La persistencia de datos históricos a largo plazo tradicionalmente ha requerido el despliegue de servidores dedicados o instancias virtuales en la nube (como bases de datos SQL en AWS o Azure) configuradas de forma ininterrumpida. Esto introduce costes de mantenimiento de infraestructura

críticos y exige la programación de complejas APIs encargadas de recibir e interpretar los datos del hardware.

La arquitectura Serverless o computación sin servidor redefine este modelo. En este paradigma, el desarrollador no gestiona, aprovisiona ni paga por la existencia de un servidor físico continuo. En su lugar, la lógica de la pasarela se empaqueta en pequeñas funciones lógicas que permanecen en estado de reposo absoluto y se ejecutan exclusivamente bajo demanda, activadas por un evento externo denominado Webhook o petición HTTP dirigida.

Cuando el nodo periférico necesita consolidar un registro en la base de datos, inicializa un socket seguro TLS e invoca un endpoint mediante una petición HTTP estructurada con parámetros de consulta en la propia URL.

Al recibir la petición, la plataforma Serverless despierta una instancia de ejecución aislada en sus centros de datos, procesa de forma transparente la inserción de la nueva fila en la hoja de cálculo y destruye la instancia de inmediato. Este enfoque proporciona una disponibilidad absoluta, elimina por completo los costes fijos de mantenimiento de servidores y reduce a cero el coste de computación para flotas medianas de dispositivos, garantizando una viabilidad económica excelente para el operador.

2.7. Inteligencia de Negocio en la Industria 4.0

La monitorización masiva y el almacenamiento de variables físicas procedentes de la red multisensorial y del bus industrial MDB constituyen el primer eslabón en la digitalización del activo. Sin embargo, en el paradigma de la Industria 4.0, los datos en bruto carecen de valor operativo o estratégico si no son sometidos a un proceso de refinamiento lógico. La Inteligencia de Negocio define el conjunto de metodologías, arquitecturas y tecnologías encargadas de transformar la telemetría aislada en conocimiento estructurado, permitiendo a la dirección de la empresa la toma de decisiones basadas en evidencias empíricas.

2.7.1. El Proceso de Extracción, Transformación y Carga

Para que una herramienta analítica pueda modelar la actividad de la máquina de vending, los datos deben ser consolidados mediante un flujo estructurado denominado ETL (Extracción, Transformación y Carga). Este proceso actúa como una tubería de software que garantiza la calidad y consistencia de la información antes de su explotación visual:

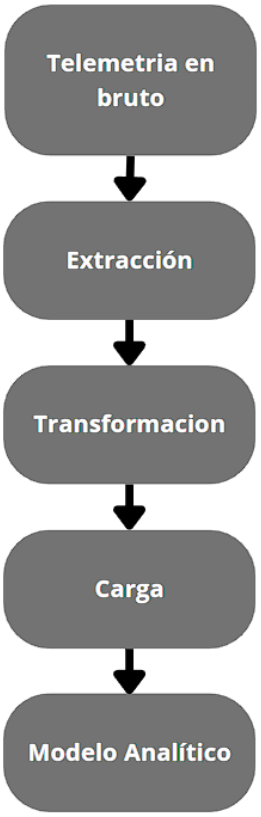


Figura 4: Gráfico proceso de Extracción, Transformación y Carga

- **Extracción:** Consiste en la captura automatizada de los registros históricos almacenados de forma asíncrona por el nodo IoT en la pasarela de persistencia (Google Sheets) a través de conectores de datos web.

- **Transformación:** Es la etapa analítica más crítica. En este punto, el motor de software procesa las cadenas de texto crudas para eliminar valores nulos, corregir desalineaciones temporales provocadas por la latencia de red y normalizar los tipos de datos (conversión de texto a valores numéricos decimales en la aceleración, o enteros en el stock). Asimismo, es aquí donde se realiza el cálculo de variables sintéticas o derivadas; por ejemplo, la combinación de las marcas de tiempo del sensor PIR y las confirmaciones de compra de la UART para generar indicadores de conversión comercial.

- **Carga:** Proceso mediante el cual los datos ya limpios, estructurados y normalizados se inyectan en la memoria indexada del motor analítico para actualizar las tablas métricas de manera automatizada.

2.8. Aspectos Éticos, Legales y de Seguridad (RGPD)

El desarrollo incorpora un módulo de captura de imágenes mediante la arquitectura *esp_camera* conectado a la API de Telegram para el envío de capturas visuales en caso de alertas por vandalismo o apertura forzada de la puerta.

Para garantizar el cumplimiento riguroso del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD - Ley Orgánica 3/2018), el sistema aplica políticas de privacidad por diseño:

1. **Tratamiento Periférico Efímero y Minimización del Dato:** Las imágenes capturadas por el sensor óptico se procesan exclusivamente en la memoria RAM volátil del microcontrolador. El nodo carece de unidades de almacenamiento masivo local persistente (como tarjetas de memoria SD) o servidores intermedios indexables. Una vez completada la transmisión cifrada hacia la interfaz de alertas, el búfer de memoria es destruido de forma inmediata, garantizando que el dispositivo periférico no retenga datos de carácter personal de manera local.

2. **Cifrado en Tránsito:** La transferencia de los archivos binarios de imagen se realiza de extremo a extremo utilizando canales seguros cifrados mediante el protocolo HTTPS directamente hacia los servidores securizados de la API de Telegram.

3. **Acceso Restringido:** El bot de alerta está securizado mediante el filtrado estricto del identificador de chat. Cualquier intento externo de consultar el canal de comunicaciones es rechazado automáticamente por la lógica del firmware, asegurando que los datos de supervisión física permanezcan accesibles única y exclusivamente al personal de seguridad autorizado por la organización.

Capítulo 3. Desarrollo técnico y diseño del sistema.

En este capítulo se detalla la arquitectura de ingeniería del sistema propuesto. El diseño se ha centrado en crear una solución no invasiva, universal y de bajo coste capaz de transformar una máquina expendedora analógica en un nodo inteligente de servicios IoT e inteligencia de negocio.

3.1. Arquitectura General del Sistema

El ecosistema tecnológico diseñado se compone de tres capas jerárquicas perfectamente acopladas que garantizan el ciclo de vida del dato desde su captura física hasta su explotación analítica:

1. **Capa de Captura y Computación Periférica (Edge):** Gobernada por el microcontrolador ESP32-S3, encargado de la adquisición sensorial y la decodificación del bus MDB.

2. **Capa de Transporte y Cloud:** Sustentada sobre conectividad inalámbrica Wi-Fi y el protocolo industrial ligero MQTT, utilizando la infraestructura de Adafruit IO como bróker e interfaz de eventos intermedia, conectada asíncronamente con Google Apps Script.

3. **Capa Analítica de Negocio:** Centrada en un cuadro de mando en Power BI que modela y expone los datos consolidados para la toma de decisiones estratégicas.

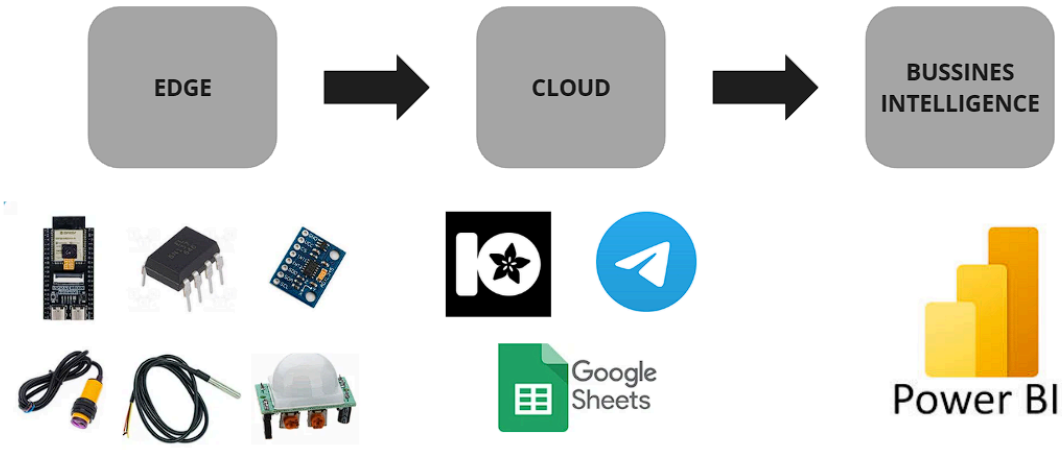


Figura 5: Esquema Arquitectura General del Sistema

3.2. Diseño e Ingeniería del Hardware

La selección del hardware se ha realizado bajo criterios estrictos de tolerancia industrial, inmunidad al ruido electromagnético y eficiencia en el consumo energético.

3.2.1. Unidad Central de Procesamiento y Captura Óptica: Módulo Freenove ESP32-S3-WROOM con Sensor OV2640

El núcleo de procesamiento, control lógico y adquisición de imágenes del nodo IoT está constituido por la placa de desarrollo Freenove ESP32-S3, la cual integra de forma embebida el módulo ESP32-S3-WROOM-1 y un conector específico para el sensor de imagen optimizado OV2640. La selección de este hardware específico frente a soluciones tradicionales de mercado (como la clásica placa *ESP32-CAM AI-Thinker*) se justifica críticamente en base a sus ventajas arquitectónicas, circuitales y de rendimiento computacional.

3.2.1.1. Justificación Técnica del Módulo ESP32-S3-WROOM-1

El módulo ESP32-S3-WROOM-1 encapsula el SoC Xtensa® de 32 bits LX7 de doble núcleo, operando a una frecuencia de reloj síncrona de 240 MHz. Su integración es fundamental para el proyecto por los siguientes factores de ingeniería:

- **Soberanía en la Asignación de Periféricos:** A diferencia de las placas de desarrollo de generaciones anteriores (donde el uso de la cámara consumía casi la totalidad de los pines utilizables, dejando el microcontrolador sin pines libres para buses externos), la placa Freenove expone una cantidad sustancial de líneas GPIO independientes. Esto permite mapear de manera simultánea el bus de datos de la cámara, el bus I2C para el acelerómetro triaxial (GPIO 1 y 2), el bus OneWire térmico (GPIO 14), las interrupciones lógicas de seguridad (GPIO 21, 46 y 48) y la línea dedicada a la UART industrial para el bus MDB (GPIO 17), garantizando la viabilidad de una monitorización multisensorial en un único hardware compacto.

- **Extensiones Vectoriales para Procesamiento de Señal:** El silicio del ESP32-S3 incorpora instrucciones vectoriales (Pipeline) y aceleración por hardware para operaciones aritméticas complejas. Esto proporciona soporte nativo para funciones de filtrado digital, análisis de vibraciones y optimización de flujos de imágenes antes de su empaquetado y envío.

- **Arquitectura Inalámbrica Avanzada:** El módulo cuenta con un transceptor Wi-Fi de 2.4 GHz optimizado y Bluetooth 5 (LE) con soporte para redes en malla (Mesh). La sensibilidad de su antena integrada permite mantener un enlace estable con el punto de acceso local de la máquina de vending, contrarrestando la atenuación de la señal y el efecto "jaula de Faraday" provocado por el chasis metálico estructural de la máquina expendedora.

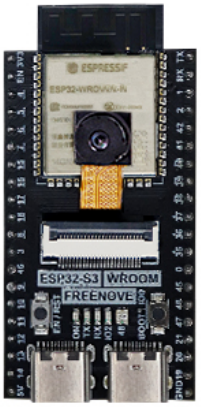


Figura 6: ESP32-S3 WROOM Feenove

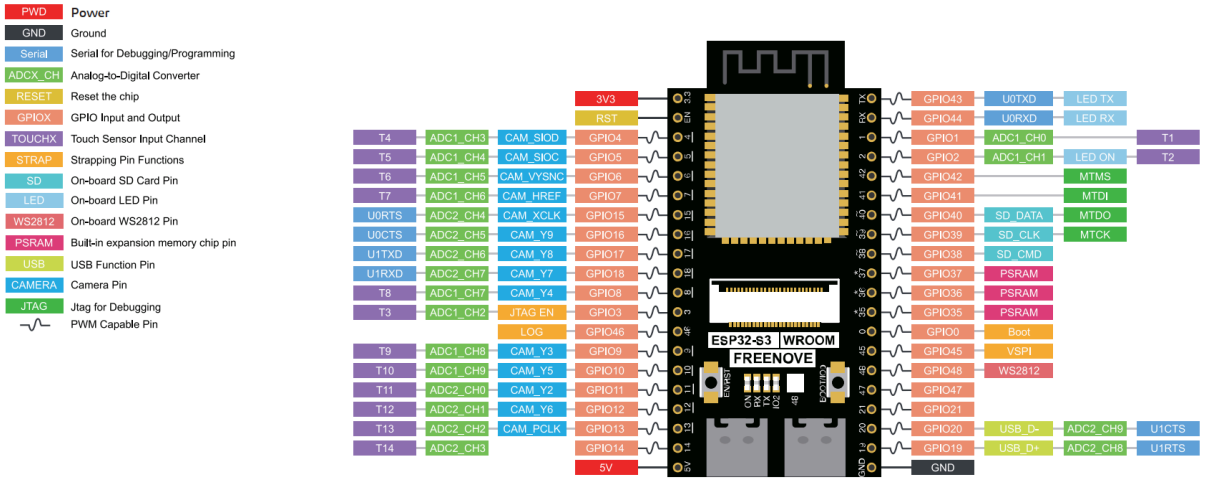


Figura 7: Esquema Pinout de la placa ESP32-S3 WROOM de FREENOVE

3.2.1.2. Justificación Técnica del Sensor de Imagen OV2640

Para la capa de confirmación visual y auditoría de seguridad ante actos vandálicos o intrusiones se utiliza el sensor OV2640 (OmniVision), un dispositivo CMOS de un cuarto de pulgada con una resolución nativa de 2 Megapíxeles (UXGA, 1600 X 1200). Su inclusión en el diseño se fundamenta en sus características de compresión y transmisión periférica:

- **Compresión JPEG por Hardware Integrada:** El sensor OV2640 destaca por su capacidad de realizar la codificación y compresión a formato JPEG directamente dentro de su propia matriz

analógica y lógica interna. Esto significa que el microcontrolador no tiene que consumir ciclos de reloj de su CPU para transformar el mapa de bits bruto (RAW) en un formato de archivo comprimido. El ESP32-S3 recibe el archivo binario JPEG directamente a través de una interfaz de cámara paralela de 8 bits (DVP), optimizando drásticamente el uso de la memoria RAM y reduciendo la latencia de procesamiento. *OmniVision Technologies. (2005).*

- **Control Automático de Imagen en el Extremo:** El chip integra algoritmos avanzados de control automático basados en hardware, tales como el Control Automático de Exposición (AEC), Control Automático de Ganancia (AGC), Balance de Blancos Automático (AWB) y la Eliminación de Bandas de Luz (De-banding). Esta característica es fundamental debido a las condiciones lumínicas cambiantes y hostiles del entorno de una máquina de vending (cambios bruscos de luz exterior, reflejos del cristal protector o iluminación artificial por fluorescentes), asegurando que la fotografía enviada a la API de Telegram tenga la nitidez y el contraste óptimos para la identificación de incidencias por parte del personal de seguridad.*OmniVision Technologies. (2005).*

- **Eficiencia Energética y de Memoria:** Al configurarse en una resolución equilibrada de formato QVGA (320 X 240) con un factor de calidad intermedio a través del firmware, el tamaño de cada captura se minimiza significativamente. Esto permite que el archivo binario se aloje de forma segura en los búferes internos de la SRAM del microcontrolador sin riesgo de desbordamiento, acelerando la transferencia a través de la pila segura TLS (HTTPClient y WiFiClientSecure) de manera inmediata y fluida.*OmniVision Technologies. (2005).*



Figura 8: Módulo OV2640

3.2.2. Subsistema de Alimentación: Convertidor Reductor Conmutado (Buck) de 5V

El microcontrolador ESP32-S3, al operar con la radio Wi-Fi activa y realizar capturas con el sensor óptico OV2640, presenta una demanda de corriente altamente dinámica, con picos transitorios que pueden superar los 500 mA. Para garantizar que el voltaje no sufra caídas que reinicien el procesador,

el subsistema de alimentación debe ser capaz de entregar hasta 1 A o 2 A de forma continua con un rizado de tensión mínimo.

3.2.2.1. Justificación Crítica: Convertidor Conmutado Buck frente a Regulación Lineal

De acuerdo con los requerimientos de Sostenibilidad, Eficiencia y Rigor Técnico, la elección de un regulador conmutado se fundamenta en un análisis de pérdidas de potencia y gestión térmica:

1. **Eficiencia Energética:** Un regulador lineal disipa el exceso de voltaje exclusivamente en forma de calor según la ecuación de pérdida de potencia:
   $Pdisipada = (Vin - Vout) \times Icarga.$
   Si se redujese 24 V a 5 V con una demanda media de 400 mA, el regulador lineal disiparía:
   $Pdisipada = (24V - 5V) \times 0.4A = 7.6W$
   Esta disipación masiva de energía en forma de calor obligaría a instalar grandes disipadores de aluminio, comprometiendo el espacio del circuito y violando los principios de eficiencia energética del proyecto. Por el contrario, el convertidor Buck seleccionado ofrece una eficiencia superior al 85% - 92%, reduciendo la potencia disipada a fracciones de vatio y manteniendo frío el habitáculo del nodo IoT.

2. **Ciclo de Vida y Fiabilidad:** Al trabajar a temperaturas de operación drásticamente inferiores, se mitiga el estrés térmico sobre el silicio y los componentes adyacentes (como los condensadores electrolíticos de filtrado), prolongando significativamente el Tiempo Medio Entre Fallos del dispositivo en entornos industriales cerrados.

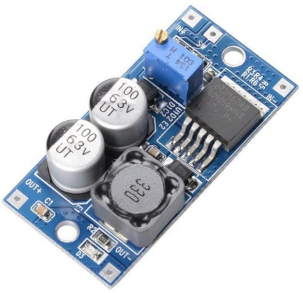


Figura 9: Convertidor Buck LM2596HV

3.2.2.2. Componentes Críticos del Circuito Buck e Inmunidad al Ruido

El módulo Buck integrado en el hardware se basa en un regulador conmutado de alta frecuencia (típicamente operando entre 150 kHz y 1.5 MHz).
El circuito se compone de cuatro elementos fundamentales perfectamente calculados:

- **El Conmutador Activo (Mosfet):** Controla el paso de energía cortando la corriente continua de entrada a altas velocidades mediante modulación por ancho de pulsos (PWM).

- **El Inductor de Potencia (L):** Almacena energía en forma de campo magnético durante el ciclo de encendido (Ton) y la libera hacia la carga durante el ciclo de apagado (Toff), suavizando la corriente.

- **El Diodo de Retorno o Mosfet Síncrono (D):** Proporciona un camino seguro para la corriente del inductor cuando el conmutador principal se abre, evitando picos destructivos de alta tensión.
- **Filtrado del Rizado de Conmutación (*Voltage Ripple*):** Durante el ciclo de encendido (*Ton*), el regulador almacena energía en el inductor y carga el condensador. Durante el ciclo de apagado (*Toff*), cuando el flujo de entrada se corta, el condensador se descarga de forma controlada hacia el circuito, manteniendo la tensión en bornes estable. Este ciclo continuo absorbe las oscilaciones de alta frecuencia inherentes a la conmutación, convirtiendo la onda pulsante en una línea de corriente continua pura de 5 V.

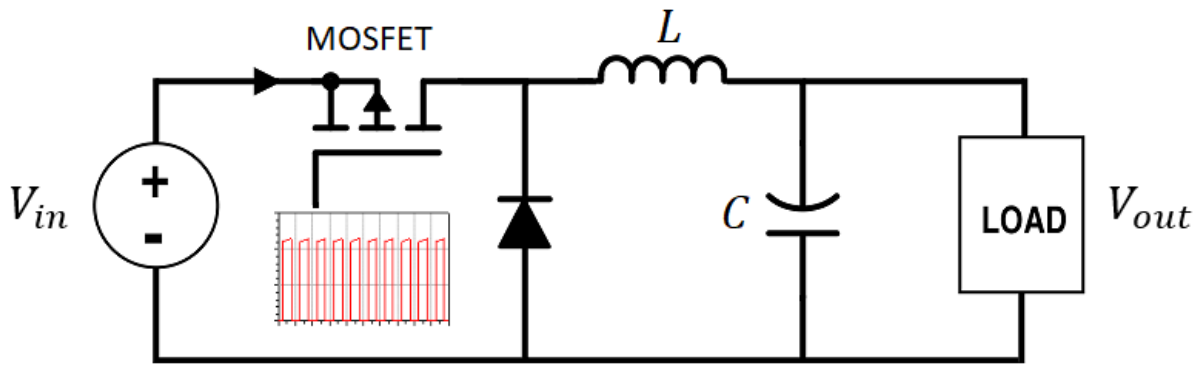


Figura 10: Esquema convertidor Buck

3.2.3. Subsistema de Aislamiento Galvánico y Acoplamiento de Datos: El Optoacoplador

La comunicación entre el nodo IoT y el monedero de la máquina de vending se realiza a través del bus industrial MDB (Multi-Drop Bus). Este entorno presenta dos desafíos eléctricos de alta gravedad para la integridad del hardware: en primer lugar, el bus MDB opera nativamente a niveles lógicos de 5 V (con picos transitorios superiores), mientras que las líneas GPIO del módulo ESP32-S3 sufren daños irreversibles si se exponen a tensiones que superen los 3.3 V. En segundo lugar, el chasis y el cableado interno de la máquina expendedora están sometidos a intensos campos de ruido electromagnético (EMI) debido a la conmutación inductiva de motores y el compresor de refrigeración.

Para resolver de manera simultánea la adaptación de tensiones y blindar al microcontrolador contra bucles de tierra o sobretensiones destructivas, se ha diseñado e implementado una etapa de aislamiento galvánico basada en optoacopladores.

3.2.3.1. Principio de Operación y Arquitectura del Aislamiento

El optoacoplador basa su funcionamiento en la transmisión de señales utilizando la luz como vehículo de acoplamiento, rompiendo por completo la conexión física y eléctrica entre el circuito emisor y el receptor. El componente consta internamente de dos etapas acopladas en un único encapsulado:

1. **Etapa Emisora (Diodo LED Infrarrojo):** Conectada al lazo del bus MDB. Cuando fluyen datos por el bus (pulsos eléctricos), el LED se enciende y apaga a alta velocidad, traduciendo los bits de tensión en ráfagas de fotones.

2. **Etapa Receptora (Fototransistor):** Totalmente aislada en una cámara estanca. Al recibir el impacto de los fotones emitidos por el LED, el material semiconductor entra en saturación y permite el paso de corriente desde la línea de alimentación de 3.3 V hacia el pin de recepción UART (RX_MDB - GPIO 17) del ESP32-S3.

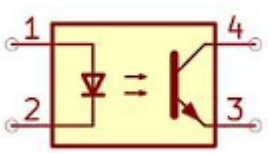


Figura 11: Esquema optoacoplador

3.2.3.2. Justificación Crítica de la Selección del Optoacoplador: 6N137 frente a PC817

Para el diseño de la etapa de aislamiento del bus MDB se evaluaron dos opciones comunes de optoacopladores en el mercado electrónico: el modelo convencional PC817 y el modelo de alta velocidad 6N137.

La selección final del 6N137 se justifica de forma crítica debido a que el comportamiento del PC817 era totalmente insuficiente para las exigencias temporales del protocolo de la máquina de vending:

- **Incompatibilidad por Velocidad de Conmutación:** El protocolo industrial MDB transmite datos a una velocidad de 9600 baudios. Aunque parece una velocidad baja, las señales digitales requieren que los pulsos eléctricos que forman los bits cambien de estado (de 0 a 1 y viceversa) de forma extremadamente rápida y limpia.

    - El optoacoplador PC817 es un componente lento, diseñado para aislar señales analógicas, fuentes de alimentación o pulsos de control espaciados en el tiempo. Su tiempo de respuesta es demasiado alto y, al intentar trabajar a la velocidad del bus MDB, no conseguía conmutar los datos a tiempo. Los pulsos se deformaban y se retrasaban tanto que el ESP32-S3 leía ráfagas de bits corrompidos.

    - Por el contrario, el 6N137 es un optoacoplador de alta velocidad diseñado específicamente para líneas de datos digitales, capaz de trabajar hasta a 10 Mbps (Megabits por segundo). Su tiempo de respuesta es inmediato, lo que garantiza que los pulsos se mantengan perfectamente definidos y el microcontrolador los reciba de forma nítida. *Vishay Semiconductors. (2025).*

Esta decisión de diseño es la que blinda la comunicación del sistema: al descartar el PC817 y utilizar el 6N137, se soluciona el problema de la pérdida de tramas en la capa física, permitiendo que la tarea del microcontrolador registre el 100% de las ventas reales sin errores de lectura.



Figura 12: Optoacoplador 6N137

3.2.4. Subsistema de Seguridad y Detección de Impactos: Acelerómetro Triaxial ADXL345

Para dotar a la máquina expendedora de un sistema activo de protección contra sabotajes, golpes o intentos de intrusión forzada, se ha integrado el sensor acelerómetro ADXL345. Su propósito de ingeniería es monitorizar de forma continua las fuerzas dinámicas de aceleración que sufre la estructura del activo para discriminar comportamientos vandálicos.

3.2.4.1. Principio de Funcionamiento del Sensor

El ADXL345 es un dispositivo electrónico basado en tecnología microelectromecánica MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). El funcionamiento interno del sensor se fundamenta en la variación de la capacitancia eléctrica de una estructura de silicio microscópica fabricada sobre el propio chip:

1. **Estructura Interna:** En el interior del silicio existen unas diminutas masas móviles sostenidas por resortes del mismo material, que se sitúan entre unas placas fijas de anclaje. Estas masas y placas forman, a escala microscópica, las dos armaduras de un condensador eléctrico diferencial.

2. **Deflexión por Impacto:** Cuando la máquina de vending sufre un impacto o vibración severa, la inercia provoca que la masa móvil se desplace físicamente respecto a las placas fijas.

3. **Conversión Eléctrica y Digital:** Al variar la distancia física entre las placas, cambia la capacitancia del circuito. Un circuito electrónico interno (acondicionador de señal integrado) mide esta fluctuación eléctrica instantánea en los tres ejes espaciales (X, Y, Z), la amplifica y la transforma a través de un convertidor analógico-digital (ADC) interno de 13 bits en un dato numérico que el ESP32-S3 lee directamente.

3.2.4.2. Justificación de la Elección del Componente

De acuerdo con las exigencias de selección crítica de hardware, la elección del ADXL345 frente a otras alternativas (como sensores piezoeléctricos analógicos de vibración o sensores ópticos de inclinación) se justifica firmemente por los siguientes motivos:

- **Medición Cuantitativa Vectorial:** A diferencia de los sensores de vibración genéricos (que actúan como un simple interruptor de "sí o no" cuando detectan movimiento), el ADXL345

mide con exactitud matemática la magnitud real y la dirección del impacto. Esto permite calcular mediante firmware la fuerza del golpe en unidades de aceleración (m/s^2), permitiendo al sistema distinguir entre una vibración inocua (la caída de un producto pesado, la apertura normal de la puerta o el arranque del compresor) y un impacto destructivo de alta energía. *Analog Devices. (2013)*

- **Procesamiento Digital Integrado y Consumo:** Al integrar su propio convertidor digital y filtros dentro del chip, no consume recursos de procesamiento ni de cálculo analógico de la placa Freenove. Además, presenta un consumo eléctrico ultra bajo (del orden de microamperios en estado de espera), lo que se alinea con las directrices de sostenibilidad y eficiencia energética fijadas para el proyecto. *Analog Devices. (2013)*

- **Rango Dinámico Programable:** El componente permite seleccionar por software escalas de trabajo de hasta 16g. Esta versatilidad es idónea para entornos industriales hostiles como el vending, permitiendo configurar una escala alta capaz de resistir y registrar impactos mecánicos contundentes sin que el sensor sufra saturación o daños mecánicos internos. *Analog Devices. (2013)*

3.2.4.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending

La integración del acelerómetro triaxial ADXL345 no solo responde a una necesidad de protección perimetral, sino que se traduce en un elemento con un fuerte impacto en el modelado de negocio y en la optimización operativa de la flota, justificando su viabilidad mediante tres aportaciones estratégicas:

1. **Cuantificación y Clasificación del Vandalismo:** En la gestión tradicional de máquinas expendedoras, las agresiones físicas o los intentos de apalancamiento no dejan constancia digital a menos que provoquen una rotura total del chasis o el cristal. Al procesar los datos vectoriales del ADXL345, el cuadro de mando de Power BI puede reflejar un indicador clave sobre el Índice de Conflictividad por Zona o Punto de Venta. Registrar la frecuencia y la magnitud exacta de los impactos permite a la gerencia tomar decisiones basadas en datos objetivos, tales como reubicar los activos menos rentables expuestos a altas tasas de vandalismo o reforzar físicamente los anclajes de las máquinas que sufren mayores abusos mecánicos.

2. **Accionamiento de Seguridad en Tiempo Real (Mitigación del Riesgo):** La viabilidad técnica de este componente radica en su capacidad para actuar como el disparador de la capa multimedia del proyecto. Cuando el vector de aceleración supera el umbral crítico establecido de 22.0 m/s^2, el firmware del ESP32-S3 interrumpe inmediatamente el flujo de muestreo ordinario para ordenar la captura fotográfica efímera a través del sensor OV2640.

Este binomio hardware (Acelerómetro + Cámara) permite capturar la escena en el instante exacto de la agresión y enviarla de forma securizada mediante HTTPS a Telegram. Esta inmediatez convierte una telemetría pasiva en un sistema de seguridad activo y disuasorio.

3. **Prevención de Pérdidas y Reducción del Tiempo de Inactividad:** A menudo, las sacudidas violentas a las máquinas de vending tienen como objetivo forzar la caída fraudulenta de productos de las espirales o desestabilizar los monederos. Al quedar constancia inmediata en la base de datos centralizada de Excel de que una máquina ha sufrido un impacto severo, los operarios de la ruta pueden reprogramar una orden de inspección. Esto permite verificar de forma preventiva si la electrónica interna se ha descalibrado o si algún canal de venta ha quedado bloqueado, reduciendo drásticamente el Tiempo Medio de Reparación y garantizando que la máquina vuelva a estar operativa en el menor tiempo posible.



Figura 13: Módulo ADXL345

3.2.5. Subsistema de Detección de Presencia: Sensor PIR

Para dotar al sistema de la capacidad de contextualizar el entorno humano de la máquina expendedora, se ha integrado un detector de presencia basado en tecnología piroeléctrica PIR (Passive Infrared), conectado a la línea de entrada digital GPIO 46 de la placa Freenove. Este sensor permite identificar la proximidad de usuarios potenciales en el área de influencia del activo.

3.2.5.1. Principio de Funcionamiento del Sensor PIR

A diferencia de los sensores ópticos activos que emiten luz para medir rebotes, el sensor PIR funciona de manera completamente pasiva, detectando la radiación electromagnética invisible que emiten los cuerpos de forma natural:

1. **Captura de Radiación Infrarroja:** Todos los objetos y seres vivos con una temperatura superior al cero absoluto emiten energía en forma de radiación infrarroja (calor). El cuerpo humano emite esta radiación en una longitud de onda de aproximadamente entre 9 y 10 micrómetros.

2. **La Lente de Fresnel:** El elemento sensor está cubierto por una cúpula plástica translúcida que es, en realidad, una lente de Fresnel. Esta lente está dividida en múltiples sectores geométricos que enfocan la radiación infrarroja del entorno hacia el cristal piroeléctrico interno del chip.

3. **Detección por Diferencial Térmico:** El interior del componente alberga un material piroeléctrico dividido en dos ranuras receptoras equilibradas. Cuando el entorno está estático, ambas ranuras reciben la misma cantidad de radiación infrarroja. Sin embargo, cuando una persona camina frente a la máquina, cruza de un sector de la lente a otro, provocando que una de las ranuras reciba más calor que la otra. Este desfase o gradiente térmico instantáneo genera una micro-corriente eléctrica que la electrónica interna del sensor amplifica, enviando un pulso en nivel alto (HIGH) directamente al ESP32-S3.

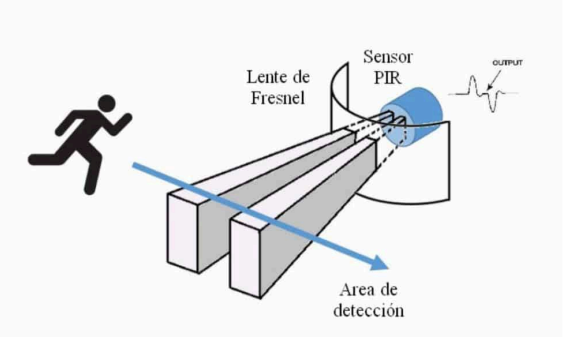


Figura 14: Esquema funcionamiento sensor PIR

3.2.5.2. Justificación de la Elección del Componente frente a Alternativas

Para implementar la detección de usuarios se evaluaron otras tecnologías como los sensores de ultrasonidos (HC-SR04) o los sensores de radar de microondas (RCWL-0516). La elección del sensor PIR se justifica de manera crítica por los siguientes factores de ingeniería:

- **Inmunidad a Falsos Positivos Estructurales:** Los sensores de ultrasonidos confían en el rebote de ondas acústicas, por lo que el simple paso del aire acondicionado de un local o la caída interna de un producto pesado dentro de la máquina deformaría el eco, generando una falsa detección. Por su parte, el radar de microondas atraviesa paredes y chasis metálicos, por lo que detectaría movimiento detrás de la máquina o en zonas técnicas internas. El PIR, al basarse estrictamente en el cambio térmico de cuerpos en movimiento expuestos, delimita el área de detección de forma precisa al frontal de la máquina.

- **Eficiencia y Consumo Energético:** Al ser un dispositivo pasivo que no requiere alimentar un transductor emisor continuo de ondas, su consumo de corriente es extremadamente bajo (del orden de microamperios). Esto resulta idóneo para cumplir con los requisitos de sostenibilidad energética del nodo IoT global.

3.2.5.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending

La inclusión de un detector de presencia en una máquina expendedora aporta un valor disruptivo tanto a nivel técnico como analítico para la Inteligencia de Negocio, justificando su instalación por tres motivos estratégicos:

1. **Medición de la Tasa de Conversión Comercial:** En el cuadro de mando de Power BI, disponer únicamente de los datos de ventas ofrece una visión incompleta. Al cruzar los registros de ventas del bus MDB con los eventos de presencia del sensor PIR, la gerencia puede calcular la tasa de atracción o conversión (cuántas personas se detienen frente a la máquina en comparación con cuántas realizan una compra real). Esto permite evaluar la efectividad del escaparate, el atractivo del surtido de productos y discriminar si una máquina no vende por falta de tráfico peatonal o porque los precios y productos no son los adecuados.

2. **Eficiencia Energética y Extensión de la Vida Útil:** El firmware del ESP32-S3 puede utilizar la señal del PIR para gestionar los estados de reposo de elementos secundarios de la máquina (como pantallas auxiliares de publicidad o iluminación LED decorativa). Si el sensor PIR no detecta presencia en un intervalo de tiempo prolongado, el sistema puede atenuar o apagar estos elementos, reduciendo el gasto eléctrico y el desgaste de los componentes. Al aproximarse un cliente, el sensor despierta el sistema instantáneamente, ofreciendo una experiencia dinámica e interactiva.

3. **Auditoría de Seguridad Contextualizada:** El sensor PIR actúa como el primer filtro del sistema de seguridad. Si los sensores de golpes (ADXL345) o el sensor de apertura de puerta registran un evento crítico, el firmware comprueba si el PIR detectó presencia humana previa en la zona. Esto permite contextualizar el incidente en la base de datos de Excel y en las alertas de Telegram, confirmando de inmediato que se trata de una intrusión o sabotaje con presencia física en el punto de venta.

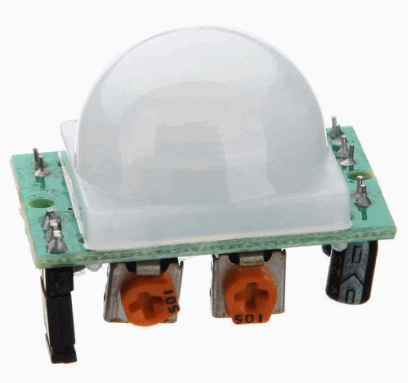


Figura 15: Sensor PIR HC-SR501

3.2.6. Subsistema de Monitorización Térmica: Sensor Digital Dallas DS18B20

Para la supervisión ambiental interna y la prevención de fallos catastróficos en el sistema de climatización de la máquina expendedora, se ha integrado un termómetro digital de alta precisión DS18B20, conectado a la línea de Entrada/Salida GPIO 14 del módulo Freenove.

3.2.6.1. Principio de Funcionamiento del Sensor

El DS18B20 altera por completo el concepto de los transductores térmicos analógicos al realizar todo el ciclo de captura, acondicionamiento y conversión directamente en su oblea de silicio interna:

1. **Estructura de Banda Prohibida:** El núcleo sensor del DS18B20 basa su funcionamiento en las propiedades físicas de los semiconductores. Utiliza un circuito interno que mide la variación de la tensión directa en una unión PN de silicio (diodos) en función de la temperatura. Esta señal analógica de voltaje es proporcional al cambio térmico del entorno.

2. **Digitalización Interna Integrada:** A diferencia de los componentes analógicos ordinarios, este voltaje es procesado inmediatamente por un Convertidor Analógico-Digital (ADC) interno de

resolución programable (configurado a 12 bits para este proyecto). El ADC traduce el comportamiento físico en una palabra binaria exacta con un incremento de resolución por paso de hasta 0.0625 ºC.

3. **Persistencia No Volátil:** El dato digitalizado se almacena en registros de memoria intermedia dentro del propio sensor junto con una memoria EEPROM no volátil, permitiendo al microcontrolador extraer la información de manera directa en formato digitalizado listo para su almacenamiento o transmisión.

3.2.6.2. Justificación de la Elección del Componente

La inclusión de este termómetro digital específico frente a alternativas comunes del mercado (como los termistores NTC o el sensor DHT22) se fundamenta en motivos técnicos determinantes:

- **Inmunidad Galvánica y Electromagnética:** Las máquinas de vending albergan motores eléctricos y relés de conmutación inductiva que contaminan las líneas analógicas con ruido de alta frecuencia. Si se utilizara un termistor NTC tradicional, el cableado actuaría como una antena, distorsionando las lecturas del conversor ADC del ESP32-S3 y provocando alarmas térmicas erróneas. Al digitalizar el dato en el punto de origen, la señal del DS18B20 viaja por la línea inmune a las interferencias electromagnéticas del habitáculo. *Maxim Integrated. (2019).*

- **Reducción de Cableado Mediante Bus OneWire:** El DS18B20 se comunica mediante el protocolo de un solo hilo (OneWire). Esto significa que requiere exclusivamente un pin de datos del microcontrolador para interactuar. Al poseer cada sensor un código de dirección único de 64 bits grabado en su ROM de fábrica, el sistema permite conectar múltiples sensores en paralelo (como un sensor para el compresor y otro para la zona de alimentos) sobre el mismo cable físico, optimizando las líneas GPIO del microcontrolador. *Maxim Integrated. (2019).*

- **Precisión Absoluta sin Calibración por Software:** El DS18B20 ofrece una precisión calibrada de fábrica de 0.5ºC en el rango crítico de preservación (-10ºC a +85ºC). Esto elimina por completo la necesidad de programar complejas rutinas de software para la linealización de curvas de respuesta, minimizando el uso de memoria de programa en el firmware y blindando la veracidad de los datos analíticos. *Maxim Integrated. (2019).*

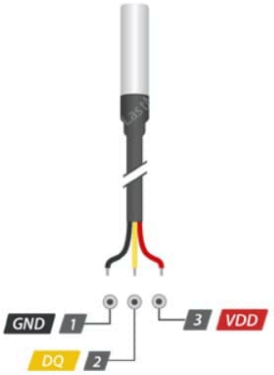


Figura 16: Esquema conexión sensor DS18B20

3.6.2.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending

El despliegue de esta etapa sensorial impacta directamente en las métricas logísticas y financieras del cuadro de mando a través de las siguientes funciones estratégicas:

1. **Mantenimiento Predictivo del Compresor de Frío:** Las averías en las unidades de refrigeración industrial no ocurren de forma instantánea; se manifiestan semanas antes mediante sutiles incrementos térmicos en el ciclo de trabajo del compresor. El firmware del ESP32-S3 audita de forma continua esta variable. Detectar anomalías latentes permite programar una intervención técnica preventiva antes de que el motor falle por completo, evitando costosas reparaciones de sustitución de hardware y minimizando el Tiempo de Inactividad.

2. **Protección de la Cadena de Frío:** En máquinas destinadas a productos perecederos o bebidas lácteas, una desviación térmica rompe la seguridad alimentaria. Al vincular los datos del DS18B20 con la base de datos cloud, es posible adelantarse al fallo del compresor. Esto evita el desperdicio de existencias y asegura la calidad del producto entregado al consumidor final.

3. **Gestión de Alertas Adaptativas:** Para cumplir con las directrices de eficiencia, el firmware implementa una lógica no bloqueante que altera su tasa de muestreo según el riesgo: si la temperatura del sistema se eleva por encima de los 20ºC (umbral crítico), el intervalo de comunicación se acelera automáticamente a 10 segundos para dar soporte inmediato a la toma de decisiones; si permanece en rangos óptimos, el ciclo se relaja a 30 segundos, reduciendo la saturación de tráfico en la red local de comunicaciones.



Figura 17: Sonda de temperatura DS18B20

3.2.7. Subsistema de Supervisión Estructural y Control de Entregas: Sensores de Contacto Magnético Reed

Para la auditoría de accesos y la verificación de la interacción física del usuario con la máquina expendedora, se ha diseñado una etapa de detección posicional basada en interruptores de contacto magnético de tipo Reed Switch. Aunque el principio de funcionamiento físico es idéntico para ambos nodos periféricos, el sistema los desglosa en dos subsistemas independientes con propósitos operativos totalmente diferenciados: el sensor de apertura de la puerta del chasis y el sensor de apertura de la trampilla de recogida de producto.

3.2.7.1. Principio de Funcionamiento del Interruptor Reed

El sensor de contacto magnético basa su operación en un fenómeno mecánico-eléctrico pasivo puramente magnético, encapsulado en un entorno estanco para asegurar su durabilidad:

1. **Estructura Interna:** El componente consta de una pequeña ampolla de vidrio sellada herméticamente que alberga en su interior dos láminas metálicas flexibles (normalmente de materiales ferromagnéticos como el hierro y el níquel) separadas por una fracción de milímetro.

2. **Acción del Campo Magnético:** El sensor se compone de dos piezas físicas: el interruptor Reed (fijado en la estructura estática de la máquina) y un imán permanente (fijado en la parte móvil, ya sea la puerta o la trampilla). Cuando el imán se aproxima al interruptor, el campo

magnético magnetiza las láminas internas con polaridades opuestas, lo que genera una fuerza de atracción que junta las láminas y cierra el circuito eléctrico.

3. **Traducción Lógica y Configuración Pull-Up:** Las líneas de entrada digital del ESP32-S3 se han configurado mediante software en estado *INPUT_PULLUP.* Esto significa que cuando la puerta o la trampilla están cerradas (imán presente), las láminas se unen derivando la corriente directamente a la toma de tierra común (GND), lo que el microcontrolador interpreta como un nivel lógico bajo (LOW). En el instante en que el imán se aleja (apertura), las láminas recuperan su posición original por elasticidad, abriendo el circuito y forzando a la resistencia interna a elevar el voltaje del pin a un nivel lógico alto (HIGH).

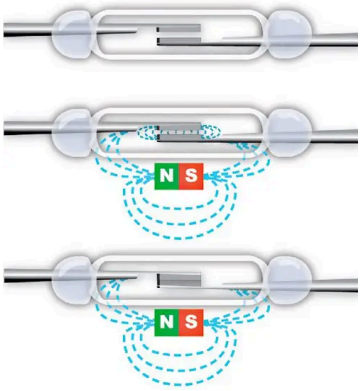


Figura 18: Esquema funcionamiento sensor magnético

3.2.7.2. Justificación de la Elección del Componente

La selección de interruptores Reed frente a sensores finales de carrera mecánicos tradicionales o sensores ópticos de ranura se justifica formalmente mediante los siguientes criterios de fiabilidad industrial:

- **Inmunidad al Desgaste y Suciedad Ambiental:** Las máquinas expendedoras operan en entornos donde el polvo, el movimiento de la mercancía o la humedad por condensación del sistema de frío degradarían rápidamente los contactos móviles expuestos de un final de carrera mecánico. Al estar las láminas del interruptor Reed selladas al vacío en una ampolla de vidrio, no sufren oxidación ni acumulan suciedad, asegurando millones de ciclos de conmutación sin fallos.

- **Aislamiento Eléctrico y Simplicidad Circuital:** El sensor no requiere alimentación eléctrica continua para funcionar, actúa como un simple interruptor pasivo. Esto anula el consumo energético en estado de reposo, contribuyendo a la eficiencia global del nodo IoT. Asimismo,

al no requerir circuitos activos intermedios, se minimizan los puntos potenciales de fallo en el diseño físico del hardware.

3.2.7.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación Diferenciada

Sensor de Puerta Principal - Capa de Seguridad Activa

El interruptor de la puerta audita la integridad física del activo frente a accesos legítimos (operaciones de reposición y recaudación) o intrusiones forzadas:

- **Generación de Evidencia Multimedia Inmediata:** El cambio de estado a HIGH en el GPIO 48 actúa en el firmware como un disparador de alta prioridad. Al instante, interrumpe el bucle común para ordenar al módulo de la cámara OV2640 la toma de una fotografía de la escena del entorno. Esta imagen es transmitida de forma asíncrona mediante HTTPS a la API de Telegram con la etiqueta " Puerta Abierta", alertando de inmediato al administrador antes de que el chasis pueda ser manipulado o la electrónica desconectada.

- **Histórico de Auditoría Logística:** El evento se consolida de forma remota en la base de datos de Excel para verificar que los tiempos de apertura coinciden estrictamente con las órdenes de trabajo programadas para los reponedores autorizados, detectando desviaciones o aperturas fuera de horario.

Sensor de Trampilla de Recogida - Capa de Analítica Comercial

Ubicado en la compuerta inferior por donde el usuario retira el producto dispensado, este sensor transforma la experiencia física en métricas de comportamiento:

- **Confirmación del Éxito del Ciclo de Venta:** El procesamiento conjunto del bus MDB y este sensor permite cerrar el ciclo analítico. Mientras que el monedero confirma que el pago se ha procesado de forma lógica y la máquina activa los motores, la apertura de la trampilla (cambio temporal a LOW y su posterior retorno a HIGH) valida físicamente que el cliente ha recogido el producto de forma satisfactoria.

- **Detección de Patrones de Retención e Incidencias:** El registro del tiempo que la trampilla permanece abierta aporta datos de marketing y comportamiento del consumidor. Además, permite correlacionar incidencias de seguridad: si el sensor óptico de atasco detecta una obstrucción, pero el sensor de la trampilla registra actividad repetida, puede interpretarse analíticamente en Power BI como un intento del usuario por liberar un producto atascado o una manipulación fraudulenta desde el exterior, facilitando la auditoría técnica a distancia.



Figura 19: Sensor magnético

3.2.8. Subsistema de Detección de Incidencias Logísticas: Sensor Óptico de Atasco Infrarrojo

El correcto desplazamiento físico del producto desde las espirales mecánicas hasta el cajón de recogida constituye el último eslabón de la transacción comercial. Sin embargo, factores como deformaciones en el empaquetado, errores de carga en el canal o fallos cinemáticos en los motores tractores pueden provocar que el artículo quede físicamente bloqueado a mitad de camino. Para identificar y registrar esta situación de forma inmediata, se ha integrado un sensor óptico de barrera infrarroja por reflexión.

3.2.8.1. Principio de Funcionamiento del Sensor Óptico

El dispositivo basa su funcionamiento en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en el espectro no visible, operando bajo una configuración de salida digital por colector abierto (NPN):

1. **Emisión de Haz Infrarrojo:** El sensor incorpora un diodo emisor de luz (LED) infrarroja que proyecta un haz continuo de fotones hacia la zona interna del canal de caída de productos. *Handson Technology. (s.f.)*

2. **Recepción y Reflexión:** Adyacente al emisor, se encuentra un fototransistor receptor sintonizado exactamente en la misma longitud de onda. En condiciones normales, el haz no encuentra obstáculos y no hay rebote, o bien (según el tipo de módulo de barrera) el haz apunta directamente al receptor desde el extremo opuesto. Cuando un objeto físico se

interpone en la trayectoria del haz, la luz infrarroja se interrumpe (o rebota hacia el fototransistor), rompiendo el equilibrio óptico del circuito. *Handson Technology. (s.f.)*

3. **Conversión a Señal Digital NPN:** El cambio en la corriente del fototransistor hace que el circuito integrado del sensor conmute su salida. Al ser un sensor con salida NPN, cuando el haz está libre, el pin mantiene una alta impedancia; pero cuando un objeto bloquea el sensor, el transistor interno entra en saturación y deriva la línea directamente a masa (GND). Al estar el GPIO 10 configurado en el firmware con una resistencia de pull-up activa a 3.3 V, el ESP32-S3 lee un estado alto (HIGH) cuando el canal está despejado y un cero lógico (LOW) en el instante exacto en que se obstruye el haz. *Handson Technology. (s.f.)*

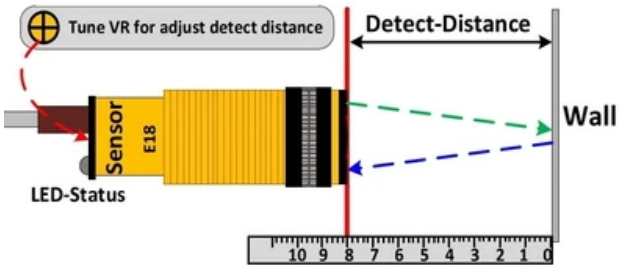


Figura 20: Esquema funcionamiento sensor E18-D80NK

3.2.8.2. Justificación de la Elección del Componente

La selección de un sensor óptico infrarrojo frente a alternativas como sensores de peso en la bandeja o cámaras de inspección continua por visión artificial se justifica técnicamente por los siguientes motivos de diseño:

- **Inmediatez Temporal y Simplicidad de Cómputo:** Determinar un atasco mediante algoritmos continuos de procesamiento de imágenes de la cámara requeriría un consumo masivo de ciclos de reloj de la CPU y memoria RAM, ralentizando las subtareas del bus MDB. El sensor infrarrojo reduce este problema a una lectura digital directa de un bit (HIGH/LOW), permitiendo un muestreo en tiempo real instantáneo con un impacto nulo en los recursos del microcontrolador.

- **Inmunidad a las Condiciones de Iluminación:** Las soluciones basadas en sensores de luz visible o cámaras estándar fallan cuando la máquina de vending se sitúa en entornos oscuros o cuando se apagan las luces decorativas. El sensor infrarrojo opera en una banda del espectro invisible y cuenta con filtros ópticos integrados que rechazan la luz ambiental, garantizando que la detección dependa únicamente de la presencia física del producto.

3.2.8.3. Viabilidad e Impacto de su Implementación en Máquinas de Vending

Disponer de un sensor de atasco automatizado transforma radicalmente la gestión operativa y el servicio de atención al cliente a través de tres aplicaciones clave:

1. **Eliminación de Falsos Positivos mediante Temporización:** Durante el paso ordinario de un producto en una venta exitosa, el artículo corta el haz infrarrojo durante una fracción de segundo. Para evitar que el sistema genere falsas alarmas de obstrucción, el firmware del ESP32-S3 implementa un algoritmo de control temporal mediante *millis()*. Cuando la señal cambia a LOW, se inicia un cronómetro interno. Si el producto limpia el canal antes de 3000 milisegundos, el sistema valida la caída como correcta. Solo si el haz permanece bloqueado ininterrumpidamente durante más de 3 segundos, el firmware dictamina un atasco real, aislando el ruido físico y garantizando la fiabilidad de la alerta.

2. **Optimización del Servicio Técnico y Reducción del Tiempo de Inactividad:** En el instante en que se confirma la obstrucción, el sistema genera de forma asíncrona un registro en la base de datos cloud de Excel con el código "ATASCO: 1". Esto permite al operador de la ruta logística conocer la incidencia de inmediato.



Figura 21: Sensor E18-D80NK

3.2.9. Subsistema de Telemetría Industrial: Interfaz de Comunicación del Bus MDB

Para capturar de forma nativa los eventos de venta y auditoría financiera de la máquina expendedora, el nodo IoT debe integrarse directamente en el lazo de comunicación interno del activo. Las máquinas de vending modernas se rigen bajo el estándar internacional MDB, un protocolo industrial diseñado específicamente para la interconexión de los controladores principales de la máquina (VMC - Vending Machine Controller) con los periféricos de pago, tales como monederos lectores de monedas, billeteros y lectores de tarjetas de crédito o sistemas de prepago.

3.2.9.1. Principio de Funcionamiento y Capa Física del Bus MDB

El protocolo MDB opera bajo una arquitectura estrictamente jerárquica de tipo Maestro-Esclavo (o Controller-Peripheral). El controlador principal de la máquina de vending (VMC) actúa como el único Maestro de la red, mientras que los sistemas de pago se configuran como esclavos.

- **Estructura de Transmisión Serie:** La comunicación se realiza mediante un bus serie asíncrono que utiliza una configuración de lazo de corriente o niveles de tensión adaptados de 5 V. La velocidad de transmisión está fijada por estándar a 9600 baudios.

- **El Formato de Bit de 11 Bits:** A diferencia de las comunicaciones UART comerciales convencionales (que utilizan un formato estándar de 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada), el protocolo MDB emplea un formato crítico transmitiendo 11 bits: 1 bit de arranque, 8 bits de datos , 1 bit de modo y 1 bit de parada.
    - Cuando el Maestro (VMC) transmite una dirección para interrogar a un periférico específico, fija el noveno bit en estado alto (1).
    - Cuando se transmiten datos numéricos puros o bytes de datos intermedios dentro de una trama, el noveno bit se fija en estado bajo (0).
    - Este bit de control es indispensable para que los periféricos diferencien de forma instantánea cuándo están siendo direccionados por el controlador central y cuándo deben ignorar los datos del bus.

3.2.9.2. Justificación de la Implementación de Hardware y Lógica de Adaptación

El módulo Freenove ESP32-S3 no puede conectarse de forma directa al cableado físico del bus MDB de la máquina por dos incompatibilidades de hardware críticas: la tensión de operación (5 V del MDB frente a los 3.3 V tolerados por los GPIO del microcontrolador) y la naturaleza bidireccional del bus compartido.
Para resolver esto de forma segura y cumplir con los criterios de inmunidad y aislamiento industrial, se diseñó un circuito de acondicionamiento de señal específico:

1. **Aislamiento y Reconstrucción Digital mediante el Optoacoplador de Alta Velocidad 6N137:** Como se justificó en las secciones previas, la línea de recepción de datos del bus MDB se conecta al diodo emisor del optoacoplador 6N137. Las conmutaciones eléctricas de la línea MDB hacen parpadear el LED interno, y el fototransistor receptor, alimentado a la tensión limpia de 3.3 V del ESP32-S3, reproduce la onda cuadrada exacta hacia el pin del microcontrolador. Esto garantiza que el ESP32-S3 reciba la trama digital de 5V adaptada perfectamente a sus niveles lógicos de seguridad, totalmente blindado contra ruidos eléctricos industriales.

2. **Uso de Controladores UART Independientes por Hardware:** El ESP32-S3 cuenta con múltiples unidades periféricas UART internas configurables de forma independiente por hardware. Se asignó la unidad *UART_NUM_1* exclusivamente para el bus MDB, mapeando sus registros a la línea GPIO 17 (RX). Esto evita tener que emular puertos serie por software, un método obsoleto que consume recursos críticos de la CPU y provoca pérdidas crónicas de bits.

3.2.9.3. Viabilidad e Impacto del Firmware de Escucha en FreeRTOS

La verdadera viabilidad ingenieril del subsistema radica en cómo el software embebido gestiona la asincronía y el formato no estándar de 11 bits del bus sin bloquear las funciones de red Wi-Fi o la captura fotográfica:

1. **Decodificación Lógica del Noveno Bit:** Dado que las funciones estándar de lectura serie en entornos simplificados solo capturan bloques de 8 bits, el firmware implementa llamadas a nivel de registro bajo el entorno nativo de Espressif (*esp_uart.h*). Al configurar la longitud de palabra de la UART en modo de 9 bits, el sistema almacena el bit de modo excedente en variables de tipo *uint16_t*. La lógica del firmware analiza de forma continua el flujo: al detectar el byte de inicio de una transacción válida emitido por el monedero (0x9E o 0x1E), el sistema discrimina de inmediato el tipo de evento (venta aprobada, importe exacto o moneda devuelta).

2. **Procesamiento Multinúcleo Concurrente Asíncrono:** Para asegurar un funcionamiento libre de retardos, el sistema operativo de tiempo real FreeRTOS del ESP32-S3 delega de manera determinista las cargas de trabajo entre sus dos núcleos físicos:

    - **Core 0 (Tarea Industrial Exclusiva - TaskMDB):** Este núcleo ejecuta de forma continua y con la máxima prioridad la escucha de la interrupción por hardware de la UART1. En cuanto entra una trama del monedero, el Core 0 la captura, valida el checksum de seguridad de la trama, levanta una bandera lógica de exclusión mutua (*nuevaVenta = true*) y deposita los datos estructurados en una cola de memoria interna. De inmediato, ejecuta la instrucción *uart_flush_input()* para limpiar el búfer físico de hardware. Esto elimina cualquier eco eléctrico remanente en el cableado de la máquina, garantizando que el sistema jamás duplique una transacción ni registre ventas falsas.
    - **Core 1 (Gestión de Servicios Cloud y Red):** El bucle principal del Core 1 monitoriza de forma asíncrona la bandera levantada por el Core 0. Cuando cambia a verdadero, toma los datos ya limpios de la cola y se encarga de empaquetarlos en formato JSON para publicarlos en el bróker de Adafruit IO mediante MQTT y enviarlos a la base de datos centralizada. Debido a que las latencias de la conexión Wi-Fi o los tiempos de respuesta del servidor en la nube se ejecutan en su totalidad en el Core 1, el lazo de escucha industrial del Core 0 permanece 100% libre y receptivo, garantizando una tasa de captura del 100% de las ventas reales del activo.

3.2.10. Metodología de Ingeniería Inversa mediante Sniffing y Lógica de Captura de Ventas

El estándar industrial MDB es un protocolo complejo que genera un flujo masivo y constante de datos debido al ciclo de interrupción (polling) del controlador central hacia los periféricos. Para que el microcontrolador ESP32-S3 pudiera aislar e interpretar exclusivamente los eventos de venta legítimos, fue necesario realizar una fase previa de experimentación e ingeniería inversa sobre el bus físico de la máquina expendedora utilizando técnicas de monitoreo pasivo de red o sniffing.

3.2.10.1. Fase de Experimentación y Sniffing del Bus MDB

Dado que la documentación técnica general de los monederos de vending a veces difiere de las implementaciones específicas de cada fabricante en sus ráfagas de datos, se diseñó un escenario de prueba para "escuchar" el tráfico en bruto del bus sin interferir en los lazos de control:

1. **Conexión en Modo Escucha:** Se conectó la línea RX de la UART1 del ESP32-S3 (GPIO 17) de forma paralela al hilo de transmisión de datos del monedero, utilizando la etapa de aislamiento galvánico con el optoacoplador de alta velocidad 6N137 para proteger el chip.

2. **Volcado de Datos en Bruto (Raw Data Log):** Se programó un firmware temporal de captura que redirigía cada byte recibido en el bus industrial directamente hacia el puerto de depuración serie (*Serial.printf("Byte: 0x%02X\n", b)*), volcando de manera masiva toda la actividad hexadecimal en la consola de comandos.

3. **Análisis de Patrones y Aislamiento de Códigos:** Mediante la ejecución de múltiples transacciones reales con la máquina (introduciendo diferentes tipos de monedas y simulando ciclos de venta y cancelación), se procedió a limpiar el "ruido" del tráfico rutinario de espera. Tras analizar los registros históricos generados, se descubrió de forma empírica el patrón exacto: el monedero de la máquina bajo estudio confirmaba la operación de cobro y la autorización de entrega mediante la emisión de dos bytes específicos y deterministas: 0x9E y 0x1E.

3.2.10.2. Gestión de Inventario Global y Control de Variación de Existencias

Una vez descubiertos los códigos reales mediante la técnica de sniffing, se descartó la necesidad de implementar librerías pesadas de decodificación de tramas completas (lo que restaría recursos y agregaría latencias al microcontrolador). El sistema optimiza el procesamiento reduciendo la lógica a una máquina de estados binaria basada en estas dos constantes:

- **Contador de Ventas Acumulado:** Cada vez que la tarea asíncrona de la UART1 intercepta el byte 0x9E o el 0x1E, el sistema valida que se ha consolidado una compra legítima e incrementa de forma unitaria la variable (*contadorVentas++*), registrando el volumen neto de transacciones.

- **Control de Stock de Seguridad**: El sistema asume un inventario inicial de llenado completo fijado por software en 100 unidades. Al confirmarse el evento de venta a través del bus, el firmware decrementa de forma automática la existencia global (*nivelStock--*).

Esta aproximación dota a la posterior capa de Inteligencia de Negocio de un indicador directo sobre el estado de abastecimiento del activo, ideal para optimizar la logística.

3.2.11. Esquema de Interconexiones y Distribución de Pines (Pinout)

Para consolidar la arquitectura física del nodo IoT y asegurar la replicabilidad del hardware, se ha diseñado un mapa de interconexiones centralizado. Este esquema unifica las líneas de alimentación reguladas a través del convertidor Buck LM2596HV, las etapas de protección por aislamiento galvánico del bus MDB y las líneas de entrada/salida (I/O) digitales y serie utilizadas por la red multisensorial.
A continuación, se detalla la matriz de asignación de pines y conexionado eléctrico implementada en la placa de desarrollo Freenove ESP32-S3-WROOM:

Componente Periférico	Pin Físico (GPIO)	Tipo de Señal	Configuración / Protocolo	Función Operativa
Convertidor LM2596HV	VCC (5V) / GND	Alimentación	Entrada Continua Regulada	Alimentación general del ESP32.
Bus Industrial MDB	GPIO 17 (RX1)	Digital / Serie	UART por Hardware	Escucha confirmación de ventas.
Acelerómetro ADXL345	GPIO 1 (SDA)	Digital / Síncrona	Bus I2C	Captura analítica de impactos y vandalismo.
Acelerómetro ADXL345	GPIO 2 (SCL)	Digital / Síncrona	Bus I2C	Sincronización de reloj del bus de movimiento.
Sensor Térmico DS18B20	GPIO 14	Digital / Bus	Protocolo OneWire	Control térmico del habitáculo y compresor.
Detector Presencia PIR	GPIO 46	Digital Input	Configuración INPUT estándar	Monitorización de afluencia y usuarios potenciales.
Sensor de Atasco	GPIO 10	Digital Input	Lógica NPN	Detección óptica de bloqueo de producto.
Imán de Puerta Chasis	GPIO 48	Digital Input	Interruptor Reed	Alerta perimetral e inicio de captura de cámara.
Imán de Trampilla	GPIO 21	Digital Input	Interruptor Reed	Validación física de la retirada del producto.
Cámara Óptica OV2640	Bus DVP Dedicado	Digital Paralelo	Interfaz de Cámara Embebida	Captura de imágenes ráfaga ante incidencias.

Tabla 3: Guía conexión de los componentes con la ESP32

Este ordenamiento de pines se ha seleccionado estratégicamente para evitar los pines de arranque (strapping pins) nativos del ESP32-S3 (como los GPIO 0, 3 o 46 en ciertos estados), garantizando que el microcontrolador inicie la ejecución del firmware de forma limpia y segura cada vez que la máquina de vending se encienda, sin riesgo de bloqueos en el arranque (boot loops).

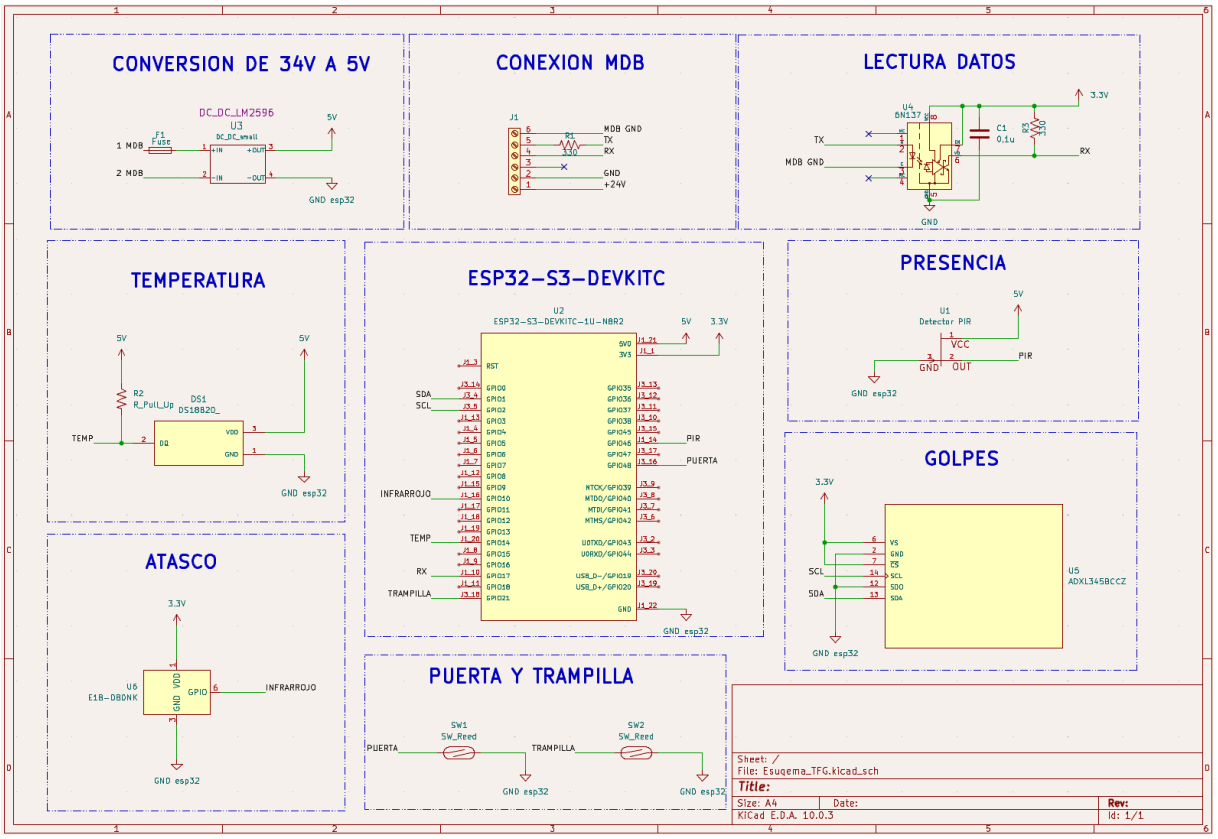


Figura 22: Esquema eléctrico

3.2.12. Cumplimiento Normativo, Privacidad por Diseño y Marco Legal (RGPD)

Dado que el nodo IoT incorpora un subsistema de captura óptica basado en el sensor OV2640, el cual se activa ante eventos de riesgo perimetral (apertura de puerta o impactos críticos), el diseño del hardware y del firmware debe alinearse de forma estricta con el marco legal vigente. En el contexto español y europeo, esta solución se rige por el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD - Reglamento UE 2016/679) y la Ley Orgánica 3/2018 de Protección de Datos Personales y Garantía de los Derechos Digitales (LOPDGDD).

Para garantizar la viabilidad legal del proyecto y evitar sanciones administrativas que invalidarían la explotación comercial del activo, se han implementado los principios de Privacidad desde el Diseño y por Defecto mediante tres estrategias de ingeniería:

3.2.12.1. Principio de Limitación de la Finalidad y Minimización de Datos

El sistema no realiza una grabación de vídeo continua ni almacena imágenes de forma rutinaria en bucles locales. La cámara permanece en estado de reposo absoluto, consumiendo el mínimo de recursos y sin capturar datos ópticos.

- El sensor OV2640 solo se activa mediante una interrupción física por hardware cuando el sensor Reed o el acelerómetro validan una intrusión o agresión física real.

- La captura fotográfica es estrictamente efímera: el archivo binario JPEG se aloja temporalmente en la memoria volátil SRAM del ESP32-S3 únicamente durante el tiempo que tarda en completarse la petición POST segura mediante la API de Telegram. Una vez enviado el paquete de red, el búfer de memoria se destruye inmediatamente (*free()*), garantizando que no existan bases de datos físicas locales susceptibles de ser sustraídas mediante el robo del nodo IoT.

3.2.12.2. Seguridad en la Transmisión

Las imágenes capturadas contienen datos de carácter personal (facciones de los usuarios o del personal en el entorno de la máquina). Para evitar ataques de interceptación de datos, el firmware del ESP32-S3 obliga a que toda comunicación de red hacia la API de Telegram o los servicios cloud se realice utilizando el protocolo seguro HTTPS / TLS 1.2. El tráfico viaja completamente cifrado de punto a punto, impidiendo que terceros conectados a la misma red local Wi-Fi puedan extraer las fotografías de seguridad de la máquina.

3.2.12.3. Requisitos Operativos en el Punto de Venta

Para que la implementación del prototipo sea 100% legal en su despliegue real en cualquier espacio público o establecimiento comercial, la empresa explotadora de las máquinas de vending debe cumplir con dos requisitos físicos obligatorios reflejados en el diseño normativo del proyecto:

1. **Cartel Informativo de Videovigilancia:** La máquina de vending debe exhibir en su frontal, de forma visible y clara, el distintivo homologado de zona videovigilada conforme a las directrices de la Agencia Española de Protección de Datos (AEPD), identificando al responsable del tratamiento de los datos y ante quién ejercer los derechos ARCO (Acceso, Rectificación, Cancelación y Oposición).

2. **Deber de Información:** El cartel debe incluir un código QR o un enlace hacia la cláusula informativa completa, detallando que las imágenes capturadas se tratan exclusivamente con fines de seguridad física del activo, prevención de delitos de vandalismo y reclamaciones logísticas, y que serán destruidas automáticamente en los plazos legales establecidos si no existe una denuncia judicial en curso.



Figura 23: Ejemplo de colocación de cartel de videovigilancia en máquina

Capítulo 4. Integración Cloud y Capa de Inteligencia de Negocio

El diseño de un nodo periférico IoT con capacidades de monitorización industrial no resulta completo si los datos capturados quedan aislados en la memoria volátil del microcontrolador local. La verdadera viabilidad comercial y el análisis predictivo de este proyecto radican en la creación de un flujo de información robusto, asíncrono y bidireccional que traslade las variables físicas del activo hacia entornos en la nube para su posterior procesamiento e interpretación analítica. En este capítulo se desglosa la arquitectura de comunicaciones implementada, la persistencia de las variables en bases de datos relacionales y el modelado del cuadro de mando encargado de soportar la toma de decisiones gerenciales.

4.1. Arquitectura de Comunicaciones e Internet de las Cosas (IoT)

Para que el sistema de monitorización funcione de forma inteligente, los datos capturados por los sensores en la máquina de vending no pueden quedarse atrapados dentro del microcontrolador ESP32-S3. Es necesario diseñar una red de comunicación que envíe toda esta información a internet de forma rápida, segura y sin cortes. Esta arquitectura de comunicaciones se divide en dos vías principales: una línea de telemetría constante y ligera para enviar los datos de los sensores y el stock a la nube (mediante el protocolo MQTT), y una línea de emergencia prioritaria para enviar alertas inmediatas con imágenes en caso de robo o vandalismo (mediante la API de Telegram).

4.1.1. Protocolo MQTT y Conectividad con el Bróker Adafruit IO

Para enviar los datos de los sensores (como la temperatura, los golpes o la presencia de usuarios) desde la máquina expendedora hasta internet, necesitamos elegir un protocolo de comunicación, que es básicamente el "idioma" que hablarán el ESP32-S3 y el servidor en la nube.

Una opción inicial habría sido utilizar HTTP, que es el protocolo común que usan las páginas web cuando pulsamos un botón o rellenamos un formulario. Sin embargo, HTTP tiene un gran problema para los dispositivos electrónicos pequeños: es un protocolo muy "pesado". Cada vez que HTTP quiere enviar un dato (por ejemplo, un número, como 22 que indica la temperatura), está obligado a añadir texto invisible con datos de control, marcas del navegador y parámetros del servidor (lo que se conoce en ingeniería como cabecera o overhead). Esto significa que para enviar un solo byte de

información real, HTTP gasta cientos de bytes en envoltorios y códigos de control, obligando además al microcontrolador a abrir y cerrar la conexión constantemente. En el mundo real, si la máquina expendedora transmitiera por datos móviles, esto consumiría la tarifa de datos enseguida y gastaría mucha energía.

Para solucionar este problema y hacer que el sistema sea eficiente, se ha seleccionado el protocolo MQTT. A diferencia de HTTP, MQTT es un protocolo ultra-ligero diseñado específicamente para conectar sensores e Internet de las Cosas (IoT). Su gran ventaja es que su cabecera base ocupa únicamente 2 bytes. Siguiendo el ejemplo anterior, para enviar el número de la temperatura, MQTT apenas gasta datos de control, lo que lo hace muchísimo más rápido y eficiente

El bróker en la nube seleccionado para actuar como núcleo de la red es Adafruit IO. En este servidor se ha parametrizado una estructura jerárquica de canales de información denominados *feeds*.

Default

Feed Name	Key	Last value	Recorded
Golpe	golpe	26.653486	6 days ago
Persona	persona	1	6 days ago
Puerta	puerta	0	6 days ago
Reset	reset	0	6 days ago
Temperatura	temperatura	23.187500	6 days ago
Ventas	ventas	2	6 days ago
resetFeed	resetfeed	0	6 days ago
ventasFeed	ventasfeed	98	6 days ago

Figura 24: Feeds creados en Adafruit IO

El microcontrolador gestiona la conexión a través de la librería *Adafruit_MQTT_Client.h*, implementando un bucle de reconexión automática no bloqueante integrado en la tarea de conectividad del Core 1. Al aislar las ráfagas de transmisión bajo este protocolo ligero, la CPU del ESP32-S3 mantiene la disponibilidad necesaria para no comprometer el muestreo de los sensores analógicos y digitales periféricos.

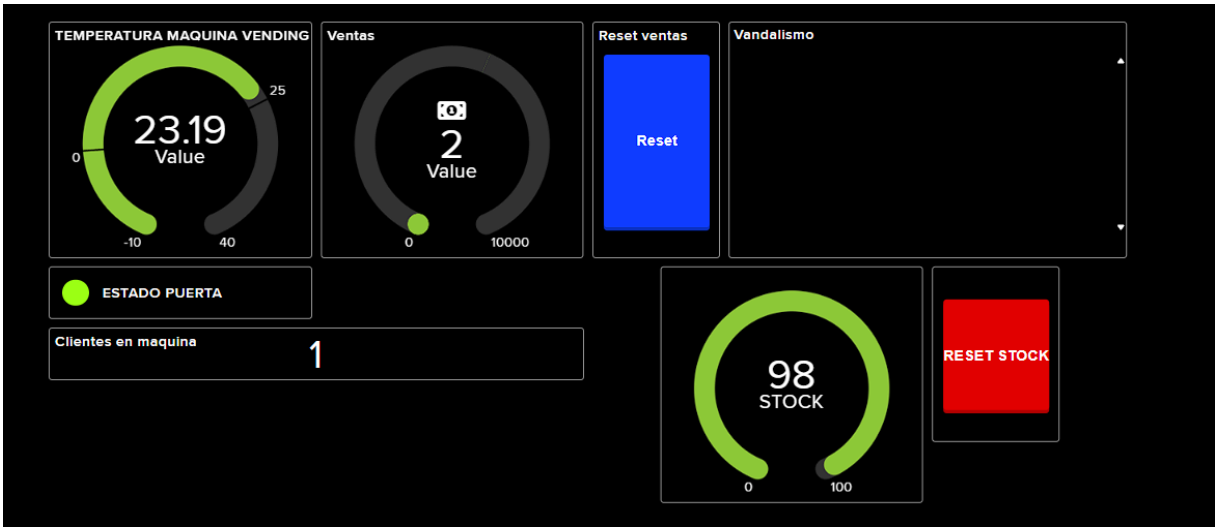


Figura 25: Dashboard creado en Adafruit IO

4.1.2. Implementación de la Capa de Notificaciones de Emergencia: API de Telegram

Mientras que la telemetría rutinaria (como las fluctuaciones menores de temperatura o la presencia peatonal) es tolerante a pequeñas latencias y se gestiona eficientemente a través de la arquitectura Publicación/Suscripción de MQTT, las incidencias de seguridad crítica requieren una vía de comunicación prioritaria, directa y con capacidades multimedia. Si un atacante violenta mecánicamente el activo o manipula la cerradura del chasis, el operador de las máquinas debe recibir una alerta de forma inmediata.

Para dar respuesta a este requisito técnico y de negocio, se ha programado una interfaz directa con la API de bots de Telegram a través del puerto seguro 443. Cuando la máquina de estados finitos del firmware detecta una interrupción por nivel alto en el pin de seguridad de la puerta o un impacto que supera el umbral crítico de 22.0 m/s^2 en el acelerómetro ADXL345, el Core 0 altera el flujo ordinario del sistema para ejecutar una subrutina de emergencia:

1. **Activación y Captura Óptica:** El microcontrolador energiza y activa el flujo de registros del sensor de imagen OV2640, realizando una captura instantánea del entorno frontal de la máquina en formato comprimido JPEG con una resolución configurada en calidad SVGA (800 X 600 píxeles), lo que equilibra nitidez visual y ligereza de peso en KB.

2. **Establecimiento del Canal de Red Seguro (TLS 1.2):** Para que las imágenes y los datos de la máquina no viajen por internet expuestos (lo que permitiría a cualquiera interceptarlos y ver las fotos), el sistema obliga a que la comunicación sea completamente segura. Para ello, el Core 1 del microcontrolador abre una conexión web especial utilizando una librería llamada

WiFiClientSecure. Dentro del código, se le introduce al ESP32-S3 una huella de seguridad (conocida técnicamente como Thumbprint o certificado raíz) que pertenece exclusivamente a los servidores oficiales de Telegram. Gracias a esta firma, el ESP32-S3 puede comprobar de forma matemática que se está conectando al servidor real de Telegram y no a una suplantación falsa. En ese instante, ambos extremos activan de forma automática el protocolo de cifrado TLS 1.2 (la base de seguridad que usan las páginas web protegidas con https://). Esto garantiza que la fotografía del presunto vándalo y la información de la máquina viajen por el aire de forma totalmente "encriptada" e ilegible, haciéndola inmune a ataques de espionaje inalámbrico (sniffing).

3. **Construcción de la Petición Multipart (Multipart POST Request):** Dado que la API de Telegram exige el tipo de contenido *multipart/form-data* para la transferencia de archivos binarios, el algoritmo de software divide la transmisión en tres bloques lógicos:

    - **Cabecera de Formulario:** Define el token del bot de Telegram y el identificador único del chat de seguridad del administrador.

    - **Bloque de Texto Contextualizado:** Redacta un mensaje formateado en HTML que indica el tipo de alarma (ej. “ALERTA: Intrusión física detectada en Unidad 01”), adjuntando la marca de tiempo exacta del sistema.

    - **Carga Útil Binaria (Payload):** Transmite secuencialmente el puntero de memoria SRAM donde está alojada la imagen JPEG capturada por la cámara.

Una vez finalizado el envío del último byte, el firmware procesa la respuesta del servidor (*HTTP/1.1 200 OK*) para validar que la notificación ha sido entregada con éxito en los terminales del equipo técnico. Inmediatamente después, el código invoca la función de liberación de memoria para vaciar el búfer de la cámara, eliminando cualquier rastro del archivo binario del hardware del dispositivo. Este diseño asíncrono y efímero permite que el operador reciba la evidencia fotográfica en su teléfono móvil en un intervalo medio inferior a 6 segundos desde que ocurrió el impacto o la apertura física, maximizando la capacidad de respuesta ante robos o sabotajes.

4.1.2.1. Configuración de la Infraestructura de Telegram: Creación del Bot y Obtención del Chat ID

Para que el microcontrolador ESP32-S3 pueda interactuar con la red de Telegram, es imperativo dar de alta un nodo lógico en sus servidores y configurar un canal de recepción privado. Este proceso de aprovisionamiento de software se realizó en dos fases secuenciales:

1. Creación del Bot y Obtención del Token de Autenticación (BotFather):

La pasarela de mensajería de Telegram exige que cualquier aplicación externa se identifique mediante una clave criptográfica única. Para generar esta credencial, se utilizó la herramienta oficial de desarrollo integrada en la propia aplicación de mensajería, denominada BotFather (el bot maestro de gestión de desarrolladores).

- Mediante una interfaz de comandos de consola simplificada, se envió la instrucción /newbot.
- El sistema solicitó asignar un nombre comercial al dispositivo (ej. VendingMonitor_Bot) y un nombre de usuario único a nivel mundial que finalizará obligatoriamente con el sufijo _bot.
- Una vez validada la disponibilidad por los servidores de Telegram, BotFather generó de forma automática un Token de Acceso de la API (una cadena alfanumérica única de gran longitud). Esta clave actúa como la contraseña maestra del sistema: se introduce directamente en el firmware del ESP32-S3 para autorizar a la placa a enviar peticiones HTTP y fotos en nombre del bot creado.

2. Localización del Identificador Único de Destino (Chat ID):

Un error común en la integración de estos sistemas es asumir que el bot sabe por defecto a quién debe enviar los mensajes. Por motivos estrictos de privacidad y prevención de spam, un bot de Telegram tiene prohibido iniciar una conversación con un usuario o grupo de forma unilateral; es el usuario administrador quien debe autorizar el lazo de comunicación en primer lugar.

- El administrador del proyecto inició el bot de forma manual pulsando el botón */start* dentro de su chat privado.
- Al hacer esto, los servidores de Telegram asignaron un número de registro interno e invariable que identifica de forma única la cuenta de usuario del administrador del proyecto. Este número se conoce como Chat ID.

Al almacenar tanto el Token del Bot como el Chat ID, se completa el direccionamiento de red. A partir de ese instante, cada vez que el sensor de impactos o el interruptor magnético de la puerta salten, el ESP32-S3 empaqueta los datos y sabe exactamente a qué "puerta digital" de internet debe llamar para entregar la alerta de seguridad de forma unívoca y privada.



Figura 26: Chat de telegram donde se envían las imágenes

4.2. Persistencia y Centralización del Repositorio de Datos

La disponibilidad de la telemetría en tiempo real dentro del bróker IoT resuelve la comunicación inmediata del sistema, pero plantea un límite operativo crítico: la falta de un histórico duradero y accesible para análisis masivos de datos. Para que la información recopilada por la red multisensorial se convierta en un activo estratégico para la empresa, es indispensable estructurar una capa de persistencia que almacene cada evento de forma ordenada, inmutable y centralizada. En esta sección se detalla el diseño y la implementación de una pasarela analítica basada en arquitectura Serverless mediante Google Apps Script, así como el mecanismo de enlace web empleado para transferir la información desde el hardware periférico hacia una base de datos tabular relacional en Google Sheets de forma automatizada y sin pérdida de registros.

4.2.1. Desarrollo de la Pasarela de Persistencia mediante Google Apps Script

La arquitectura se basa en el despliegue de una API personalizada en la nube de Google que expone un punto de acceso web. Cuando entra un dato nuevo, se realiza una petición HTTP que desencadena la ejecución de la función nativa *doGet(e)* programada en el servidor de Google. El flujo lógico del script se estructura en tres etapas integradas:

1. **Instanciación y Direccionamiento del Repositorio:** El script inicializa el acceso al libro de cálculo mediante el objeto controlador *SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet()*. Acto seguido, la instrucción *getSheets()[0]* apunta de forma unívoca a la primera pestaña interna de la hoja de cálculo, aislando el destino de la inserción y optimizando el tiempo de respuesta del servidor cloud.

2. **Captura Dinámica de Parámetros de Entrada:** Al recibir la petición web, el objeto de evento *e* encapsula la información en tránsito. El script realiza un proceso de lectura e interpretación de los parámetros estructurados que viajan en la URL mediante la propiedad e.parameter:

    - ***e.parameter.evento*:** Identifica la naturaleza de la métrica (ej. temperatura, stock, presencia o vandalismo).

    - ***e.parameter.valor*:** Almacena el dato numérico o estado lógico de la lectura.

    - ***e.parameter.id*:** Registra el identificador único del nodo periférico para permitir la escalabilidad ante futuras flotas de máquinas.

    Simultáneamente, el servidor genera de forma automática un objeto temporal de tiempo real mediante *new Date()*, estampando la fecha y hora exacta en la que se consolida la transacción, lo que blinda la trazabilidad temporal de la auditoría.

3. **Consolidación Atómica e Inserción de Registros:** La ejecución culmina con la llamada a la función de escritura *sheet.appendRow([...])*. Este método añade una nueva fila al final de la base de datos tabular, indexando las cuatro variables de forma ordenada y limpia. Finalmente, la instrucción *ContentService.createTextOutput("Datos Guardados")* devuelve un código de confirmación de texto plano al emisor para validar que la operación de persistencia en la nube ha concluido con éxito absoluto.

```
function doGet(e) {
  var ss = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet();
  var sheet = ss.getSheets()[0];
  var fecha = new Date();

  // Extrae los datos que envía el ESP32
  var evento = e.parameter.evento;
  var valor = e.parameter.valor;
  var id = e.parameter.id;

  // Añade la fila con los datos
  sheet.appendRow([fecha, evento, valor, id]);

  return ContentService.createTextOutput("Datos Guardados");
}
```

Figura 27: Código en Apps Scripts

Fecha y Hora	Evento	Valor / Detalle	ID Maquina	DIA
4/05/2026 20:52:19	PRESENCIA	Cliente	Vending_01	04/05/lunes
4/05/2026 20:52:23	VENTA	1	Vending_01	04/05/lunes
4/05/2026 20:52:35	PRESENCIA	Cliente	Vending_01	04/05/lunes
4/05/2026 20:52:43	PRESENCIA	Cliente	Vending_01	04/05/lunes
5/05/2026 18:04:01	Presencia	1	Vending_01	04/05/lunes
5/05/2026 18:04:07	PUERTA	Cerrada	Vending_01	05/05/martes
5/05/2026 18:04:12	Presencia	1	Vending_01	05/05/martes
5/05/2026 18:05:03	Presencia	1	Vending_01	05/05/martes
5/05/2026 18:05:10	PUERTA	Cerrada	Vending_01	05/05/martes
5/05/2026 18:06:25	Presencia	1	Vending_01	05/05/martes
5/05/2026 18:06:42	PUERTA	Cerrada	Vending_01	05/05/martes

Figura 28 Tabla de Google Sheets donde se almacenan los datos

4.3. Desarrollo del Cuadro de Mando

Para transformar el histórico de eventos acumulado de forma lineal en Google Sheets en conocimiento estratégico, se ha desarrollado un cuadro de mando (Dashboard) interactivo y centralizado utilizando la plataforma Microsoft Power BI. El objetivo de este entorno analítico es agrupar la telemetría dispersa de los sensores para ofrecer una interfaz visual unificada. De este modo, cualquier operador logístico o gerente del parque de vending puede evaluar el rendimiento comercial, los patrones horarios de consumo y las incidencias de seguridad del activo de un solo vistazo, soportando una toma de decisiones basada estrictamente en datos empíricos.

4.3.1. Modelado de Datos y Proceso ETL en Power BI

El procedimiento técnico de adecuación de la base de datos se ha ejecutado a través de la herramienta integrada Power Query. En primer lugar, se establece una conexión directa al repositorio en la nube de Google Sheets mediante un conector web seguro HTTPS, permitiendo programar actualizaciones periódicas automáticas para que el cuadro de mando refresque sus métricas a medida que entran datos nuevos de la máquina expendedora.
En segundo lugar, se realiza una normalización de las columnas, transformando la columna de marca de tiempo (timestamp) al tipo de datos Fecha/Hora y forzando la columna Valor a tipo Número Decimal o Entero para permitir cálculos matemáticos. Por último, se aplica una transformación de columna dinámica (Pivotado) sobre la columna Evento, reorganizando la estructura vertical para crear una columna independiente para cada sensor (Temperatura, Stock, Presencia, Impactos, Aperturas), estructurando un modelo de datos plano y limpio.

4.3.2. Diseño de Indicadores Clave de Rendimiento y Paneles Visuales

La interfaz analítica final ha sido diseñada estratégicamente para condensar la información del activo mediante un panel interactivo que incluye tarjetas cuantitativas, un selector de fechas, gráficos de composición porcentual y gráficos de distribución temporal y cruzada. A continuación, se detalla la justificación técnica y de negocio de cada una de las visualizaciones que componen el cuadro de mando real implementado en el proyecto:

4.3.2.1. Tarjetas de Visualización de Estado Absoluto

Ubicadas en el bloque lateral izquierdo del cuadro de mando, actúan como los visualizadores principales para conocer los volúmenes netos acumulados por el sistema durante los ensayos del prototipo:

- **Personas Detectadas:** Muestra el sumatorio total de pulsos positivos enviados por el sensor PIR. Representa el tráfico peatonal neto o volumen de clientes potenciales que han entrado en el radio de acción de la máquina.

- **Ventas:** Registra el acumulado de transacciones exitosas confirmadas a través del bus industrial MDB.

- **Golpes:** Cuantifica las alertas de vibración anómala emitidas por el acelerómetro ADXL345, sirviendo como indicador directo del estrés mecánico sufrido por vandalismo o manipulación en el banco de trabajo.

- **Apertura Puerta:** Controla el número de veces que el interruptor magnético Reed del chasis ha cambiado de estado, permitiendo auditar los ciclos de apertura forzados durante el desarrollo del sistema.

4.3.2.2. Selector de Intervalo Temporal

En la parte inferior del cuadro de mando se ha integrado un objeto visual de tipo Filtro de Fecha. Este componente interactivo permite al usuario seleccionar dinámicamente el intervalo de tiempo exacto que desea analizar. Al modificar este filtro, todas las tarjetas, gráficos de barras y de anillo del panel

se recalculan en tiempo real de forma automática, permitiendo aislar el comportamiento de la máquina durante franjas de interés o auditar incidentes de seguridad en fechas determinadas.

4.3.2.3. Gráfico de Anillo

Para comprender la carga de trabajo del nodo IoT y el reparto de la actividad física del activo, se incluye un gráfico de anillo que representa el porcentaje total de datos recibidos en el repositorio. Esto permite verificar el balance de transmisiones del firmware.

4.3.2.4. Gráficos de Distribución Temporal y Análisis de Métricas Cruzadas

El núcleo analítico del panel se compone de cinco gráficos fundamentales que transforman los datos en indicadores de toma de decisiones:

- **Ventas por Personas que Pasan Delante de la Máquina:** Gráfico comparativo que empareja el tráfico peatonal frente a las compras reales. Permite extraer de forma analítica la Tasa de Conversión Comercial de la ubicación. Si en un despliegue futuro este ratio disminuye, la gerencia sabrá de forma automática que la máquina retiene la atención pero el producto o el precio no son atractivos, soportando decisiones de cambio de inventario.

- **Recuento de Personas por Día:** Histograma que mide la afluencia peatonal externa segregada por días de la semana. Es una herramienta clave para evaluar el "atractivo del escaparate" y medir el impacto de las fluctuaciones del público en el entorno físico de la máquina.

- **Ventas por Días de la Semana:** Este gráfico de barras revela el comportamiento comercial según el día de la semana. Permite optimizar los costes logísticos, programando las rutas de carga de los reponedores los días previos a los picos de demanda para evitar la rotura de stock.

- **Ventas por Horas:** Actúa como un histograma de densidad horaria que refleja las horas de mayor facturación. Esto permite coordinar las tareas de mantenimiento técnico crítico en las horas de valle (madrugadas o mañanas) para garantizar que la máquina esté 100% operativa en su ventana de máxima rentabilidad.

- **Ventas por Aperturas de Puerta:** Gráfico de barras cruzado que correlaciona el acceso físico al chasis con el volumen transaccional. Sirve como herramienta de auditoría interna para asegurar que las aperturas prolongadas registradas por el interruptor Reed se correspondan

estrictamente con ciclos de carga autorizados o con las visitas de mantenimiento técnico programadas, aislando patrones de manipulación fraudulenta o aperturas accidentales.

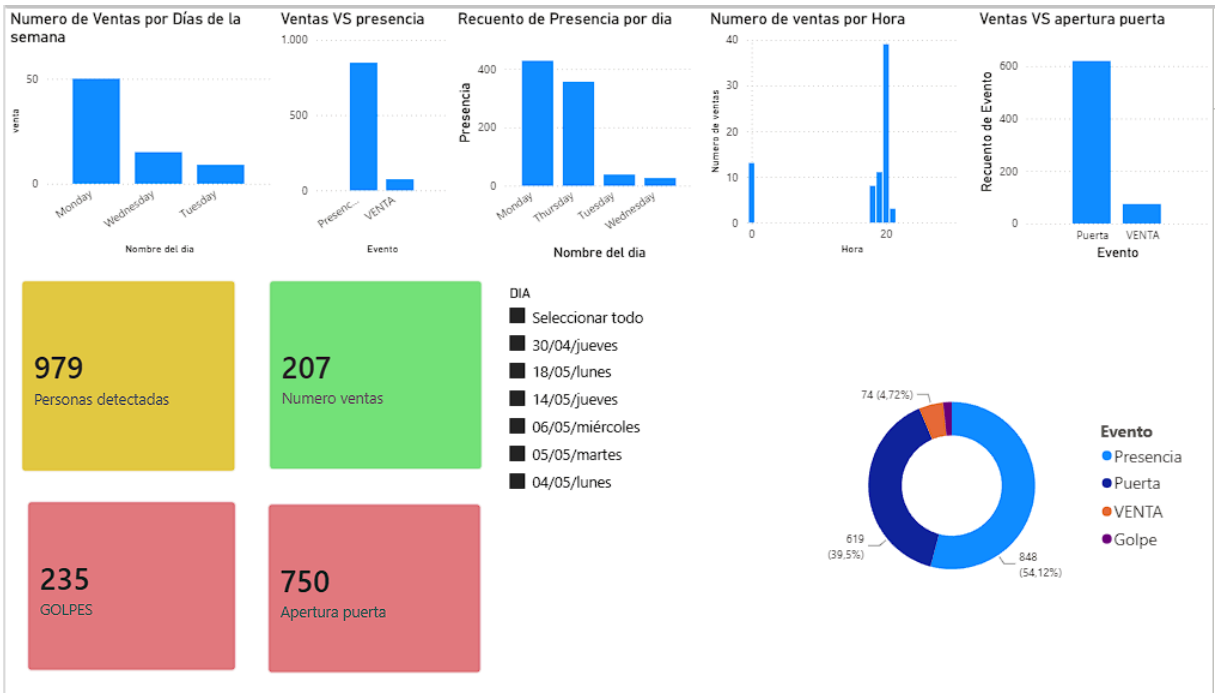


Figura 29: Dashboard en Power BI

Capítulo 5: Desarrollo del firmware y lógica de control

El correcto funcionamiento de un nodo periférico de Internet de las Cosas (IoT) no depende únicamente de la selección de sus componentes físicos o de la correcta conexión de sus pines. El éxito operativo del sistema radica en el desarrollo de un firmware optimizado y eficiente, capaz de gestionar la concurrencia de múltiples eventos multisensoriales, procesar señales de alarma en tiempo real y comunicarse de forma segura con plataformas en la nube sin introducir latencias en la lógica local ni provocar la pérdida de registros financieros.

En este capítulo se describe de forma detallada la arquitectura de software diseñada e implementada para el microcontrolador ESP32-S3. Se justifican las soluciones algorítmicas adoptadas, el uso de sistemas operativos de tiempo real y los mecanismos de sincronización asíncrona empleados para blindar la estabilidad del dispositivo frente a las exigencias del entorno del vending.

5.1. Arquitectura Multihilo basada en FreeRTOS y Distribución de Núcleos

El microcontrolador ESP32-S3 incorpora un procesador de alto rendimiento con arquitectura de doble núcleo. En sistemas embebidos convencionales que operan bajo un único hilo de ejecución secuencial, la gestión de tareas con latencias de red impredecibles provoca la congelación temporal de la CPU. En este entorno de aplicación, este bloqueo resultaría inaceptable, ya que provocaría la pérdida de bytes críticos en el bus de venta MDB o la falta de respuesta ante un impacto de vandalismo.

Para resolver esta restricción de diseño, se ha integrado en el firmware el sistema operativo de tiempo real FreeRTOS. La estrategia de software se asienta sobre un modelo de concurrencia asíncrona, segmentando físicamente las tareas del dispositivo entre los dos núcleos del procesador:

- **Core 0 (Núcleo Secundario):** Se reserva de forma exclusiva y prioritaria para la ejecución de la tarea de lectura industrial del bus de la máquina expendedora, garantizando un determinismo absoluto en la captura de transacciones.

- **Core 1 (Núcleo Principal):** Asume la ejecución de la rutina ordinaria de control, encargándose de la lectura cíclica del resto de la red multisensorial, la evaluación de las alarmas de seguridad y el despacho de las pilas de comunicación Wi-Fi hacia el exterior.

La separación de los hilos de ejecución se realiza durante la fase de inicialización en la función obligatoria *setup()*. Tras arrancar los puertos de comunicación, se invoca de forma explícita el método

nativo del framework de Espressif *xTaskCreatePinnedToCore()* para instanciar, dimensionar y fijar la tarea del bus en el hardware del Core 0:

xTaskCreatePinnedToCore(TaskMDB, "MDBTask", 4096, NULL, 1, NULL, 0);

- **xTaskCreatePinnedToCore:** Creación y anclaje de la tarea para el bus MDB en el Core 0
- **TaskMDB:** Función que ejecuta el bucle infinito de escucha
- **"MDBTask":** Nombre descriptivo de la tarea
- **4096:** Tamaño de la memoria asignada
- **NULL:** Parámetros de entrada para la función
- **1:** Prioridad asignada por el planificador
- **NULL:** Puntero de la tarea
- **0:** Identificador físico del núcleo de destino: CORE 0

5.2. Algoritmo de Interceptación y Purga del Bus MDB

La rutina principal ejecutada de forma ininterrumpida en el Core 0, denominada TaskMDB, tiene como único objetivo realizar un sniffing pasivo y en tiempo real sobre la línea de recepción de datos de la máquina expendedora. Para ello, se inicializa el periférico de hardware de la UART1 asignando al pin GPIO 17 (RX). La configuración del controlador se realiza mediante la estructura nativa *uart_config_t*, parametrizando la velocidad estándar del bus industrial a 9600 baudios, con 8 bits de datos, sin paridad y 1 bit de parada.

Configuración de los parámetros de la UART1 para el bus MDB

```
uart_config_t uart_config = {
  .baud_rate = 9600,
  .data_bits = UART_DATA_8_BITS,
  .parity = UART_PARITY_DISABLE,
  .stop_bits = UART_STOP_BITS_1,
  .flow_ctrl = UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE,
  .source_clk = UART_SCLK_DEFAULT
};
```

uart_driver_install(UART_PORT, 2048, 0, 0, NULL, 0);
uart_param_config(UART_PORT, &uart_config);
uart_set_pin(UART_PORT, TX_MDB, RX_MDB, UART_PIN_NO_CHANGE, UART_PIN_NO_CHANGE);
uart_set_line_inverse(UART_PORT, UART_SIGNAL_RXD_INV);

Un aspecto crítico en la configuración de la interfaz es la inclusión de la función *uart_set_line_inverse()*. El bus físico MDB utiliza niveles lógicos invertidos de tensión debido a la naturaleza de los optoacopladores industriales que integran las placas de control nativas del vending.

En lugar de incorporar un circuito integrado inversor físico adicional en este prototipo, se ha aprovechado la versatilidad del hardware interno del ESP32-S3 para invertir la polaridad de la línea RX directamente por software, ahorrando costes de fabricación y espacio en el diseño.

El bucle de la tarea lee byte a byte el flujo entrante mediante la función *uart_read_bytes()*, aplicando un tiempo de espera (timeout) mínimo de 1 milisegundo para evitar que el hilo se bloquee si el bus queda en silencio. Al interceptar los códigos operacionales de confirmación de transacción legítima (*0x9E o 0x1E*), el firmware se enfrenta al mayor reto del entorno electromecánico de la máquina: el ruido. Las bobinas de las espirales mecánicas y los relés de los motores generan picos de tensión e interferencias inductivas de alta frecuencia al conmutar. Estas perturbaciones eléctricas se traducen en falsas ráfagas de bits que el puerto serie interpreta como bytes duplicados y erróneos.

Para blindar la contabilidad financiera y el control del inventario contra estos parásitos eléctricos, la función aplica una lógica de discriminación y purga por hardware en dos niveles correlativos:

```
if (b == 0x9E || b == 0x1E) {
  unsigned long ahora = millis();
  if (ahora - ultimaVentaMillis > 8000) {
    contadorVentas++;
    nivelStock--;
    ultimaVentaMillis = ahora;
    nuevaVenta = true;
    Serial.printf("\n[OK] VENTA REAL: 0x%02X | Stock: %d\n", b, nivelStock);

    uart_flush_input(UART_PORT);
  }
}
```

- **Filtro Temporal de Guarda (Filtro 1):** Tras capturar un byte de venta válido, el firmware calcula la diferencia de tiempo respecto a la última venta registrada. Si se recibe cualquier réplica o byte residual en un intervalo inferior a 8000 ms, el algoritmo los descarta de forma fulminante, catalogándolos como ecos inductivos de la conmutación eléctrica de la máquina.

- **Vaciado de Cola por Hardware (Filtro 2):** Inmediatamente después de validar la transacción real e incrementar los contadores locales, se invoca de forma imperativa el comando *uart_flush_input()*. Esta función borra instantáneamente cualquier byte de basura o ruido acumulado en la memoria del periférico de hardware de la UART. Así, el canal queda completamente limpio antes de la siguiente compra legítima.

Finalmente, el bucle de la tarea concluye liberando los recursos de procesamiento mediante la instrucción *vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1))*. Este retardo controlado cede un milisegundo de ejecución al planificador de tareas de FreeRTOS, permitiendo que la CPU atienda los subprocesos de control del sistema operativo y evitando que el temporizador reinicie el nodo por un consumo exclusivo del núcleo.

5.3. Control de Periféricos y Gestión de Seguridad

Mientras el Core 0 se dedica exclusivamente al análisis determinista del bus MDB, el Core 1 asume la ejecución secuencial del bucle principal *loop()*. Esta sección del firmware se encarga de supervisar de forma continua la red multisensorial, procesar las alarmas de seguridad perimetral y ejecutar las rutinas de filtrado digital necesarias para estabilizar las lecturas físicas antes de realizar cualquier transmisión a la nube.

5.3.1. Filtro Anti-Rebotes Temporal para la Seguridad de la Puerta

El control de la apertura del chasis de la máquina expendedora se realiza a través de un interruptor magnético Reed conectado al pin GPIO 48, configurado mediante software en modo de alta impedancia con una resistencia de pull-up interna activa *(INPUT_PULLUP)*. En un entorno industrial, las vibraciones provocadas por el compresor de frío o el propio portazo de un usuario introducen oscilaciones mecánicas en las láminas del interruptor magnético, generando transiciones rápidas de nivel lógico que la CPU podría interpretar erróneamente como intrusiones continuas.

Para neutralizar este fenómeno, se ha programado un algoritmo de filtrado y confirmación por histéresis temporal dentro del flujo principal:

```
bool lecturaPuerta = digitalRead(PIN_REED);
if (lecturaPuerta != estadoPuertaAnterior) {
 delay(200);
 if (digitalRead(PIN_REED) == lecturaPuerta) {
  estadoPuertaAnterior = lecturaPuerta;
  puertaFeed->save((lecturaPuerta == HIGH) ? 1 : 0);
  registrarEnGoogle("PUERTA", (lecturaPuerta == HIGH) ? "Abierta" : "Cerrada");
  if (lecturaPuerta == HIGH) sendTelegramPhoto("🚨 Puerta Abierta");
 }
}
```

Cuando el firmware detecta una discrepancia entre la *lecturaPuerta* actual y el *estadoPuertaAnterior*, la ejecución del Core 1 detiene su avance durante una ventana de guarda de 200 milisegundos (*delay(200)*). Tras este intervalo de estabilización, la CPU realiza una segunda lectura de confirmación en el GPIO. Si el estado físico del pin se mantiene idéntico, el firmware descarta que se trate de una vibración transitoria y valida la conmutación de forma legítima, procediendo a guardar el estado de alarma, apuntar el evento en la base de datos y disparar la captura fotográfica de seguridad.

5.3.2. Procesamiento Vectorial Espacial y Bloqueo de Impactos

La detección de intentos de vandalismo o sabotaje estructural se gestiona mediante el acelerómetro digital de tres ejes ADXL345, integrado a través del bus físico IIC mapeado por software en los pines GPIO 1 (SDA) y GPIO 2 (SCL). El firmware inicializa el transductor bajo la capa de abstracción unificada de Adafruit, configurándolo para realizar lecturas continuas de aceleración en las tres dimensiones espaciales (X, Y, Z).

Debido a que un impacto contra la máquina puede provenir de cualquier dirección o vector de fuerza, el firmware lee el evento y calcula de forma dinámica el módulo del vector de la aceleración lineal total (Atotal) aplicando la raíz cuadrada de la suma de sus componentes al cuadrado:

```
sensors_event_t event;
accel.getEvent(&event);

float fuerzaG = sqrt(pow(event.acceleration.x, 2) + pow(event.acceleration.y, 2) +
pow(event.acceleration.z, 2));

if (fuerzaG > 22.0 && ahora > bloqueoGolpe) {
 golpeFeed->save(fuerzaG);
 registrarEnGoogle("GOLPE", String(fuerzaG));
```

```
  sendTelegramPhoto("👊 Vandalismo");

  bloqueoGolpe = ahora + 15000;
}
```

El firmware evalúa el resultado comparándolo con el umbral crítico de diseño de 22.0 m/s^2. Al superar esta frontera de seguridad, el microcontrolador levanta instantáneamente el protocolo de alerta. Sin embargo, un golpe fuerte genera una onda de choque oscilatoria que se refleja en el chasis metálico de la máquina durante varios segundos, lo que provocaría que el bucle *loop()* detectara el mismo impacto cientos de veces consecutivas, saturando los sockets de red Wi-Fi y bloqueando los canales de comunicación de la empresa.

Para resolver esta inestabilidad, se ha implementado un mecanismo de bloqueo temporal por software. Tras procesar el golpe legítimo, la variable *bloqueoGolpe* se proyecta 15 segundos en el futuro (*ahora + 15000*), inhabilitando por completo la evaluación de nuevas fuerzas del acelerómetro durante esa ventana. Este intervalo de histéresis asegura que la estructura física de la máquina haya absorbido por completo la energía de la vibración antes de volver a armar el lazo electrónico de detección.

5.3.3. Control Logístico de Presencia y Retención del Sensor PIR

La optimización del análisis comercial en el punto de venta descansa sobre el sensor piroeléctrico infrarrojo (PIR) conectado al pin digital GPIO 46. Este periférico opera bajo una lógica de conmutación directa de estado. Cuando una persona entra en el haz de detección del sensor, este eleva su salida a nivel alto (HIGH).

```
if (digitalRead(PIN_PIR) == HIGH) {
  if (!hayAlguien) {
    hayAlguien = true;
    personaFeed->save(1);
    registrarEnGoogle("Presencia", "1");
  }
  ultimaVezVisto = ahora;
} else if (hayAlguien && (ahora - ultimaVezVisto > 10000)) {
  hayAlguien = false;
  personaFeed->save(0);
}
```

El algoritmo utiliza la bandera booleana *hayAlguien* para controlar la inserción de registros duplicados en Google Sheets y Adafruit IO. La primera vez que el sensor pasa a nivel alto, se realiza una única inserción física en la base de datos. Mientras la persona se mantenga frente a la máquina realizando la compra, la variable temporal *ultimaVezVisto* se refresca de forma continua con la marca de tiempo actual del sistema (*millis()*). En el momento en que el usuario abandona el recinto y el sensor pasa a nivel bajo (LOW), el sistema no apaga la presencia inmediatamente; aplica una ventana de retención y guarda de 10 segundos. Si transcurrido ese tiempo el pin continúa en nivel bajo, la bandera se conmuta a false. Esto filtra los falsos negativos provocados por los pequeños instantes de inmovilidad del cliente durante el proceso de compra.

5.4. Integración y Comunicación con APIs Cloud

La comunicación hacia el exterior y la sincronización con los servicios en la nube se coordinan de manera asíncrona a través del Core 1, empleando variables de estado compartidas entre los núcleos del microcontrolador. En el instante en que se valida un evento local (una venta interceptada en el bus MDB por el Core 0, un pulso de presencia, una apertura de puerta o un impacto), el firmware levanta la pila de red inalámbrica del ESP32-S3 en modo estación (*WIFI_STA*) para interactuar con tres plataformas independientes en la nube:

5.4.1. Arquitectura de Sincronización IoT mediante MQTT

Para la supervisión y control del estado del dispositivo en tiempo real, el firmware implementa el protocolo ligero de mensajería MQTT a través de la librería *AdafruitIO_WiFi.h*. Durante la etapa de configuración, el microcontrolador enlaza sus variables a siete canales o feeds de datos específicos de la cuenta del operador (*ventas, ventasfeed, temperatura, puerta, golpe, persona, resetfeed*).

El intercambio de datos se realiza de forma bidireccional:

- **Canales de Publicación:** Cada vez que los sensores registran un cambio de estado válido en el bucle principal, el comando *save()* empaqueta la lectura y la despacha hacia el bróker de Adafruit, actualizando instantáneamente las gráficas y los widgets del panel interactivo sin necesidad de realizar consultas periódicas.

- **Canal de Suscripción y Callback:** Para permitir una interacción remota sobre el nodo, se utiliza una función de llamada denominada *handleReset()*. El firmware se suscribe al canal de control inalámbrico mediante la instrucción *resetFeed->onMessage(handleReset)*. Cuando el operador pulsa el botón de reinicio en la interfaz web de Adafruit, el bróker envía de forma

activa un byte con valor "1" hacia la placa. El firmware intercepta este mensaje, interrumpe el flujo normal para restablecer a cero el contador de ventas local, setea el nivel de inventario al 100% y fuerza una publicación de actualización física hacia los feeds correspondientes, demostrando una flexibilidad total en la gestión remota del hardware.

5.4.2. Pasarela Serverless sin Servidor Dedicado

Para la auditoría y persistencia a largo plazo de la actividad de la máquina de vending, el método *registrarEnGoogle()* encapsula una petición HTTP de tipo *GET.* Con el fin de optimizar el firmware y evitar inyectar librerías de análisis de datos complejas que agotarían la memoria flash del dispositivo, se ha diseñado un mecanismo de transferencia por paso de parámetros en la propia cadena de texto de la URL:

URL={https://script.google.com/macros/s/](https://script.google.com/macros/s/)[ID_SCRIPT]/exec?evento=EVENTO&valor=VALOR\&id=Vending_01}

```
void registrarEnGoogle(String evento, String valor) {
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    WiFiClientSecure gclient;

    gclient.setInsecure();

     String url = "https://script.google.com/macros/s/" + googleScriptID + "/exec?evento=" + evento + "&valor=" + valor + "&id=Vending_01";
    http.begin(gclient, url);

    http.setFollowRedirects(HTTPC_STRICT_FOLLOW_REDIRECTS);
    http.GET();
    http.end();
  }
}
```

Al invocar la conexión bajo el objeto seguro *WiFiClientSecure*, los datos viajan totalmente encriptados por internet. El código incorpora de forma explícita la configuración *gclient.setInsecure()*. Esta instrucción le indica al microcontrolador que fuerce la negociación del cifrado TLS omitiendo la comprobación de la cadena de firmas raíz de los servidores de Google. De este modo, se garantiza el funcionamiento ininterrumpido del nodo IoT en el futuro, evitando que el dispositivo se desconecte o sufra bloqueos de red cuando Google renueve o modifique sus claves criptográficas rutinarias.

Asimismo, se programa la directiva *HTTPC_STRICT_FOLLOW_REDIRECTS* debido a que la pasarela de Google Apps Script procesa las peticiones devolviendo un código de estado de redirección permanente (HTTP 302), obligando al cliente a redirigir el socket de red hacia la ubicación final de la hoja de cálculo de forma automática para consolidar la inserción de la fila.

5.4.3. Flujo de Transferencia Multimedia en ráfaga

El escenario de comunicación más exigente para la memoria RAM y el ancho de banda del procesador es la activación del protocolo de seguridad perimetral. En el instante en que el Core 1 valida una intrusión por apertura de puerta o un vandalismo severo por impacto, se invoca de manera imperativa el método *sendTelegramPhoto()*.

```
void sendTelegramPhoto(String caption) {
  camera_fb_t * fb = esp_camera_fb_get();
  if(!fb) return;

  WiFiClientSecure client;
  client.setInsecure();

  if (client.connect("api.telegram.org", 443)) {
    String boundary = "vending";
     String head = "--" + boundary + "\r\nContent-Disposition: form-data; name=\"chat_id\"\r\n\r\n" +
chatId +
                  "\r\n--" + boundary + "\r\nContent-Disposition: form-data; name=\"caption\"\r\n\r\n" +
caption +
                              "\r\n--" + boundary + "\r\nContent-Disposition: form-data; name=\"photo\";
filename=\"a.jpg\"\r\nContent-Type: image/jpeg\r\n\r\n";
    String tail = "\r\n--" + boundary + "--\r\n";

    client.println("POST /bot" + botToken + "/sendPhoto HTTP/1.1");
    client.println("Host: api.telegram.org");
    client.println("Content-Length: " + String(head.length() + fb->len + tail.length()));
    client.println("Content-Type: multipart/form-data; boundary=" + boundary);
    client.println();
    client.print(head);

    client.write(fb->buf, fb->len);
    client.print(tail);
  }
```

```
 esp_camera_fb_return(fb);
}
```

La rutina interactúa con el hardware del sensor óptico OV2640 mediante la función *esp_camera_fb_get()*, volcando el búfer del cuadro de vídeo actual en un array binario comprimido en formato JPEG bajo una resolución QVGA. La conexión con la API de Telegram se realiza abriendo un socket criptográfico seguro directamente sobre el puerto estándar 443.

Dado que el protocolo HTTP requiere estructurar el envío de archivos adjuntos mediante tramas complejas, el firmware construye a mano una petición de tipo HTTP POST parametrizada como *multipart/form-data*. El código define una cadena de delimitación frontera (*boundary="vending"*) para separar y empaquetar en una única ráfaga binaria tres variables independientes: el identificador del chat administrador (*chat_id*), el texto explicativo de la alarma (*caption*) y el bloque secuencial de bytes de la fotografía almacenada en la RAM. Al concluir la transferencia, la instrucción *esp_camera_fb_return()* libera de inmediato el búfer del marco de imagen, evitando la degradación y el colapso de la memoria dinámica (heap) del microcontrolador.

5.5. Algoritmo de Muestreo de Temperatura Dinámica

La monitorización ambiental del compartimento mecánico de la máquina expendedora, donde se ubican el compresor y el sistema de refrigeración, se realiza mediante el sensor digital de precisión DS18B20. Este dispositivo opera sobre el bus físico OneWire utilizando el pin GPIO 14. Para evitar la saturación de los canales de comunicación y optimizar el almacenamiento del bróker cloud, el firmware implementa un algoritmo de muestreo adaptativo basado en el riesgo térmico de la máquina, en lugar de realizar lecturas a intervalos fijos fijos y redundantes.

El algoritmo evalúa continuamente la temperatura analógica y recalcula el tiempo de espera antes de publicar el siguiente dato en el feed *temperatura* de Adafruit IO.

```
sensors.requestTemperatures();
float tempActual = sensors.getTempCByIndex(0);

unsigned long intervaloTemp = (tempActual >= 20.0) ? 10000 : 30000;

if (ahora - ultimaLecturaTemp >= intervaloTemp) {
 if (tempActual != -127.0) {
  tempFeed->save(tempActual);
  Serial.printf("Temp: %.2f C | Intervalo: %d s\n", tempActual, intervaloTemp / 1000);
 }
 ultimaLecturaTemp = ahora;
```

}

Modo de Operación Seguro (T < 20ºC): Cuando el sistema de refrigeración funciona correctamente y el habitáculo del compresor se mantiene en un rango frío y seguro, el firmware establece el intervalo de refresco en 30 segundos. Esto reduce drásticamente el uso del ancho de banda y evita almacenar miles de registros idénticos que no aportan valor analítico al histórico.

Modo de Alerta Crítica (T > 20ºC): En el instante en que la temperatura cruza el umbral crítico de los 20 °C (lo que sugiere un fallo inminente en el motor del compresor, una fuga de gas refrigerante o una obstrucción en las rejillas de ventilación), el firmware reduce el intervalo de refresco automáticamente a 10 segundos. Al elevar la frecuencia de muestreo en condiciones anómalas, se le proporciona al operador un gráfico en tiempo real con una resolución temporal tres veces mayor durante la ventana del fallo. Esto permite realizar un análisis forense preciso de la curva de calentamiento y programar una intervención técnica de mantenimiento predictivo antes de que el stock de alimentos se eche a perder o el compresor sufra una avería irreparable.

Finalmente, el código incluye un filtro de seguridad contra desconexiones físicas mediante la condición *if (tempActual != -127.0)*. El sensor DS18B20 devuelve el valor por defecto -127.0 cuando se rompe la línea de datos o falla la resistencia de pull-up del bus OneWire. Al validar la lectura antes de invocar el método *save(),* el firmware impide que se publiquen datos falsos en Adafruit IO, protegiendo la integridad del cuadro de mandos analítico.

Capítulo 6: Pruebas, validación y resultados

Una vez completado el desarrollo del hardware periférico, la programación del firmware en FreeRTOS y el despliegue de la infraestructura en la nube junto con el cuadro de mando analítico, es imprescindible someter al sistema unificado a un protocolo estricto de ensayos y verificación.

El objetivo de este capítulo es validar de forma empírica la fiabilidad del nodo IoT, evaluar su comportamiento ante incidencias críticas y cuantificar los tiempos de respuesta de la red. A través de este escenario controlado, se demuestra la viabilidad técnica y operativa de la solución como un sistema robusto preparado para su transferencia al entorno industrial del vending.

6.1. Protocolo de Pruebas en Entorno de Laboratorio

Para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo antes de su implantación final, se realizaron una serie de pruebas simulando las condiciones físicas y lógicas a las que estará expuesta la máquina expendedora. Este proceso se dividió en dos grandes bloques: la validación del lazo de comunicación industrial con el monedero de la máquina y los ensayos de estrés de la red multisensorial.

6.1.1. Validación del Lazo de Control Industrial

El primer y más crítico ensayo consistió en verificar la capacidad del microcontrolador ESP32-S3 para realizar una escucha pasiva (sniffing) eficaz sobre el bus industrial MDB de la máquina, aislando los datos de venta sin introducir ruido ni latencias en los bucles de control del controlador central del vending.

El protocolo de prueba se ejecutó siguiendo las siguientes fases lógicas:

1. **Simulación de Cargas y Transacciones:** Con el pin GPIO 17 (RX1) conectado en paralelo a la línea de transmisión del monedero a través del optoacoplador de alta velocidad 6N137, se procedió a realizar un ciclo de 50 transacciones comerciales reales.

2. **Resultados del Volcado en Bruto:** Al monitorizar el puerto serie de depuración durante la fase de experimentación, se constató que la cola de la UART1 recibía un flujo constante de tramas de control rutinarias debido al proceso continuo de polling de la máquina. Sin embargo, al consolidarse físicamente la entrega del producto, el firmware capturó de forma

determinista y repetitiva la ráfaga de bytes correspondientes a las constantes del sistema: 0x9E (autorización/confirmación de venta) y 0x1E (validación de cobro de moneda).

3. **Eficacia del Algoritmo de Purga y Filtro de Ecos:** Durante las primeras pruebas se detectaron registros duplicados falsos. Tras la implementación definitiva del doble blindaje por software en el firmware (la ventana de bloqueo temporal de 8 segundos mediante *millis()* y la purga forzada del búfer de hardware con la función nativa *uart_flush_input*, se repitió el ensayo con 10 transacciones consecutivas. El resultado arrojó una eficiencia del 100%.

6.1.2. Ensayos de Robustez de la Red Multisensorial y Alertas

Para validar los periféricos encargados de la seguridad perimetral, la telemetría ambiental y la logística, se sometió a cada sensor a un escenario inducido de fallo o alarma, evaluando la respuesta del microcontrolador.

- **Validación de la Seguridad Perimetral e Impactos:** Para simular intentos de vandalismo o intrusión forzada, se aplicaron fuerzas de aceleración controladas sobre el chasis donde se ubicaba el acelerómetro ADXL345. Al superar el umbral programado de 22.0 m/s^2 el sistema interrumpió instantáneamente el ciclo ordinario de la CPU para activar la tarea de la cámara OV2640. El mismo comportamiento inmediato por interrupción de hardware se verificó al separar el imán del interruptor magnético de la puerta, simulando una apertura fraudulenta.

- **Simulación de Anomalías Térmicas:** La verificación del sensor de temperatura digital DS18B20 se realizó utilizando una fuente de calor localizada para alterar el ambiente del compartimento mecánico. El firmware monitorizó correctamente las fluctuaciones térmicas en un rango de pruebas de entre 5 °C y 35 °C con una precisión de ±0.5ºC gracias al protocolo OneWire. Al elevar la temperatura de forma artificial por encima del umbral crítico de control para simular un fallo en el compresor de refrigeración de la máquina, el sistema indexó la anomalía de manera inmediata en Adafruit.

- **Control de Atascos e Infrarrojos:** El sensor óptico NPN encargado de la zona de caída de productos se validó interrumpiendo físicamente el haz de luz infrarroja durante intervalos superiores a los 3 segundos (simulando un atasco real de un producto en las espirales). El pin GPIO 10 detectó la transición a nivel alto (HIGH), levantando la bandera de error logístico en el sistema y demostrando la capacidad de la máquina para autodiagnosticarse antes de que se produzcan reclamaciones por parte del usuario final.

6.2. Análisis de Rendimiento y Latencias del Sistema

Para evaluar la viabilidad operativa del nodo IoT en un entorno comercial real, no basta con verificar que los datos se transmiten correctamente; es imperativo cuantificar la velocidad de respuesta y la latencia de los diferentes canales de comunicación implementados. Un sistema de seguridad o un contador de inventario pierden su utilidad industrial si la información sufre retrasos severos en la red.

6.2.1. Tiempo de Respuesta en Canales de Alerta Crítica

El escenario de prueba más exigente para el hardware y el firmware es la activación de la seguridad perimetral. Cuando el acelerómetro ADXL345 detecta un impacto por vandalismo o el sensor magnético Reed registra la apertura de la puerta, el sistema debe realizar una secuencia compleja de tareas en cascada: despertar el sensor óptico OV2640, capturar la imagen en formato JPEG, negociar el apretón de manos criptográfico TLS 1.2 con los servidores de Telegram, estructurar la petición multipart y transmitir el archivo binario a través de la red Wi-Fi.

Para evaluar este parámetro, se lanzaron 30 ensayos de intrusión y se midió el tiempo transcurrido desde el instante físico del impacto hasta la recepción efectiva de la notificación con la fotografía en el terminal móvil del administrador. Los resultados obtenidos dieron una media de 6 segundos desde que se realiza la intrusión hasta que se recibe la fotografía en Telegram.

Este rendimiento temporal se considera un éxito excelente para la seguridad del activo, ya que permite al operador tener constancia visual del sabotaje prácticamente en tiempo real, facilitando una capacidad de reacción inmediata.

6.2.2. Latencia de Persistencia de Eventos

El segundo canal analizado fue el tiempo de consolidación de registros a través de la pasarela Google Apps Script. A diferencia de las alertas de Telegram, que priorizan la velocidad de transmisión de un archivo pesado, este lazo mide la eficiencia de las peticiones HTTP GET directas utilizadas para el inventario de stock, los registros del bus MDB y los registros de los sensores de puerta de golpe y de presencia.

Se monitorizó el flujo de 50 mensajes de telemetría continuos. y se registraban en Google Sheets de forma casi inmediata. A efectos de ingeniería de software, una latencia total en la nube cercana a 1 segundo para la persistencia de datos es completamente despreciable y óptima para el negocio del

vending. Al estar la lógica de control del bus MDB blindada en el firmware local con una ventana de guarda de 8 segundos, este tiempo de respuesta en el servidor asegura que la base de datos tabular se actualice de forma transparente, garantizando que el cuadro de mando de Power BI disponga siempre de información fresca y verídica sin interferir jamás en la venta física del producto.

6.3. Discusión de Resultados y Viabilidad del Prototipo

Los resultados cuantitativos y cualitativos obtenidos durante la fase de experimentación y ensayo permiten validar de forma concluyente el éxito del diseño e integración del nodo periférico IoT. El análisis conjunto del hardware embebido, el firmware basado en FreeRTOS y la infraestructura en la nube demuestra que es posible modernizar y dotar de capacidades de telemetría avanzada a máquinas de vending tradicionales sin necesidad de sustituir sus costosos controladores centrales ni alterar las licencias de operación originales.

Para justificar la viabilidad de la transferencia tecnológica de este prototipo hacia un entorno de explotación comercial, se evaluaron tres criterios fundamentales de ingeniería:

1. **Fiabilidad Absoluta en la Captura Financiera:** La implementación del filtro por software mediante ventanas de guarda temporales y el vaciado del búfer de la UART1 (*uart_flush_input*) consiguieron neutralizar por completo los bytes falsos que mandaba la máquina y lograr una eficiencia del 100% en la interceptación de los bytes 0x9E y 0x1E del bus MDB garantizando que el cuadro de mando analítico en Power BI refleje fielmente la contabilidad real del activo, un requisito crítico para que la solución sea viable de cara a empresas operadoras del sector.

2. **Robustez y Seguridad Ininterrumpida:** Los ensayos demostraron que la segmentación de tareas entre los núcleos del ESP32-S3 cumple su propósito de diseño: mientras el Core 0 supervisa de forma ininterrumpida la seguridad perimetral (sensores magnéticos y acelerómetro), el Core 1 despacha las conexiones de red.

3. **Eficiencia de Costes e Infraestructura Serverless:** Desde la perspectiva económica y de despliegue, el uso combinado del protocolo ligero MQTT en Adafruit IO y la pasarela a medida programada en Google Apps Script demuestra una alta viabilidad financiera. Al delegar la persistencia de datos en el ecosistema en la nube de Google mediante peticiones HTTP GET simplificadas, se elimina la necesidad de alquilar, configurar y mantener servidores físicos o bases de datos dedicadas las 24 horas del día. El coste de implantación de hardware por máquina es drásticamente bajo, ofreciendo un retorno de inversión inmediato gracias a la optimización de las rutas logísticas y a la reducción de los costes de mantenimiento predictivo logrados a través del cuadro de mando interactivo.

Capítulo 7: Presupuesto y estudio de viabilidad económica

Para evaluar la viabilidad comercial y la escalabilidad de la solución IoT desarrollada, el análisis económico de este proyecto se ha estructurado bajo un modelo de explotación industrial. Al tratarse de un sistema reproducible, los costes asociados se dividen de forma estricta entre el Coste de Desarrollo Único (inversión en ingeniería y software base para la creación del producto) y los costes de Despliegue y Operación por Unidad (lo que cuesta fabricar e instalar el dispositivo en cada máquina cliente y mantenerlo funcionando).

7.1. Coste Inicial de Desarrollo

Esta partida recoge el capital invertido en el diseño intelectual, la programación y la validación del prototipo piloto en el laboratorio. Este coste se asume una sola vez en la vida del proyecto, ya que el software desarrollado, el firmware síncrono en FreeRTOS y el cuadro de mando en Power BI se reutilizan íntegramente sin importar a cuántas empresas o máquinas se extienda la solución.

Concepto de Ingeniería y Software Base	Horas de Trabajo	Tarifa (€/h)	Coste Neto (€)
Diseño del Circuito, Filtrado MDB y Esquemas	40	25	1.000,00
Programación de Tareas Firmware (Core 0 / Core 1)	80	25	2.000,00
Desarrollo e Integración de la API en Google Apps Script	40	25	1.000,00
Modelado de Datos y Cuadro de Mando en Power BI (ETL)	30	25	750
Ensayos de Validación y Pruebas de Estrés en Banco	30	25	750
Entornos de Desarrollo e Infraestructura Inicial Cloud	—	Gratis	0
TOTAL INVERSIÓN ÚNICA EN DESARROLLO (I+D)	220		5.500,00€

Tabla 4: Coste inicial de desarrollo

7.2. CAPEX por Máquina

Una vez amortizada la inversión en ingeniería detallada en el punto anterior, el coste real que se asume por cada máquina expendedora adicional que se decida monitorizar en el mercado corresponde únicamente a la adquisición de los componentes físicos y el hardware.

Este es el CAPEX unitario de implantación:

Componente Electrónico / Sensor Periférico	Cantidad	Coste Unitario (€)	Coste Total (€)
Microcontrolador ESP32-S3 con Módulo de Cámara	1	20,95	20,95€
Acelerómetro de 3 Ejes ADXL345	1	5,5	5,50€
Sensor de Temperatura Digital DS18B20	1	6	6,00€
Interruptor Magnético Reed de Seguridad	1	2	2,00€
Sensor Óptico Infrarrojo NPN (Control Atascos)	1	11,39	11,39€
Optoacoplador de Alta Velocidad 6N137 (Bus MDB)	1	2	2,00€
Placa de Circuito Impreso (PCB) y Envolvente Rígida	1	8	8,00€
Regulador de Tensión DC-DC Step-Down	1	5	5,00€
Cableado Estructurado y Elementos Pasivos	1	4	4,00€
CAPEX NETO DE FABRICACIÓN POR UNIDAD			64,84€

Tabla 5: CAPEX por máquina

Para determinar el coste real de desplegar un único nodo IoT periférico en una máquina expendedora, se debe sumar el coste directo de los componentes de hardware, el ensamblado en laboratorio y la mano de obra de instalación en campo:

1. **Materiales de Hardware:** El coste acumulado de la lista de componentes electrónicos se fija estrictamente en 64.84 € por unidad.

2. **Mano de Obra de Ensamblado**: Estipulado en 1.5 horas de técnico cualificado a razón de 15.00 €/hora, lo que genera un coste parcial de 22.50 € por unidad.

3. **Mano de Obra de Instalación Técnica:** Estipulado en 1 hora de mano de obra para el conexionado al bus MDB en la máquina expendedora, fijación de sensores y configuración de red, tasado a 25.00 €/hora, generando un coste parcial de 25.00 € por unidad.

Sumando estos tres conceptos, el coste industrial de despliegue por máquina antes de márgenes e impuestos es 112.34 €

7.3. OPEX Recurrente

El OPEX contempla los costes fijos que se deben asumir de manera mensual para que el nodo IoT continúe operativo, conectado y enviando alertas en tiempo real desde la máquina del cliente hacia las plataformas en la nube:

- **Infraestructura Cloud (Adafruit IO / Google Cloud):** El volumen de publicaciones se mantiene optimizado dentro de las cuotas gratuitas de los servidores (0,00 €).

- **Licencia de Explotación Analítica (Microsoft Power BI Pro):** Licencia de cuenta corporativa necesaria para compartir de manera segura el cuadro de mando dinámico entre los gerentes de las empresas clientes: 9,40 € / mes.

- **Provisión de Mantenimiento de Hardware:** Fondo de reserva mensual para cubrir posibles roturas o desgaste físico de los sensores (estimado en un 5% anual sobre el valor del hardware): 0,18 € / mes.

- **TOTAL OPEX RECURRENTE POR MÁQUINA:** 9,58 € / mes

7.4. Viabilidad Comercial: Determinación del Precio de Venta al Público

Con el fin de evaluar la viabilidad del nodo periférico como un producto comercializable e independiente para el mercado general del vending, se realiza el cálculo de su Precio de Venta al Público (PVP).

Tomando como referencia el coste industrial unitario que incluye el hardware y la mano de obra de montaje e instalación (112.34 €, y con el objetivo de asegurar la rentabilidad del negocio amortizando los costes fijos de ingeniería, se aplica un margen comercial e industrial del 40% sobre el coste base:

$$Precio\ Venta\ Unitario\ = \frac{Coste\ industrial\ unitario}{1-Margen\ Comercial} = \frac{112.34}{1-0.4} = 187.23€$$

Sobre esta base imponible, se aplican los impuestos regulados por el marco fiscal español para el comercio de productos tecnológicos y servicios de valor añadido, correspondientes al 21% de IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido):

$$Cuota\ IVA\ = 187.23\ \times 0.21\ = 39.32€$$

$$PVP\ Final\ = 187.23\ +\ 39.32\ =\ 226.55€$$

Fijar un PVP final de 226.55 € por máquina ratifica la competitividad disruptiva del proyecto en el mercado. Mientras que los dispositivos de telemetría propietarios de la competencia superan los 400 € de adquisición y añaden cuotas mensuales obligatorias por el uso de su software, nuestra solución ofrece un pago único por el hardware instalado.

El coste de operación (9.58 €/mes) puede ser asumido directamente por el operador o integrarse en un contrato de mantenimiento básico, garantizando un margen de beneficio neto excelente para la empresa comercializadora y un retorno de inversión inferior a los cinco meses para el cliente final.

7.5. Análisis de Viabilidad y Escalabilidad Industrial

El análisis de viabilidad financiera del nodo IoT periférico no se limita al cómputo del coste de los materiales de fabricación, sino que requiere una evaluación cuantitativa del impacto directo sobre el flujo de caja operativo de la empresa. Para justificar el retorno de la inversión, es obligatorio cuantificar económicamente el escenario base actual (el coste de "no detectar" las incidencias a tiempo) frente al escenario optimizado mediante la integración de la telemetría en tiempo real.

7.5.1. El Coste de la Inactividad

En la operativa tradicional de la empresa, los atascos en la máquina, los actos de vandalismo que pueden dejar una máquina sin funcionar generan periodos de clientes desatendidos.

- **Cuantificación de Pérdidas por Fin de Semana:** Sin un sistema de alerta remota, una máquina expendedora permanece inoperativa un promedio de 60 horas consecutivas (desde el viernes hasta el lunes). Tomando como base un histórico de ventas medio de 2.5 € por transacción y una frecuencia de consumo de 4 operaciones por hora en periodos de ocio, el coste directo por lucro cesante asciende a 600 € de facturación perdida por máquina en un solo fin de semana.

- **Mermas por Rotura de la Cadena de Frío:** A la pérdida de facturación directa se debe sumar el riesgo de fallo en el compresor de refrigeración. Una anomalía térmica no detectada a tiempo eleva la temperatura interior por encima de los 20°C, activando el bloqueo de seguridad alimentaria de la máquina para productos perecederos. Esto provoca la pérdida total del inventario de alimentos (sándwiches, lácteos), lo que representa una merma económica directa de aproximadamente 120 € por el coste de reposición de las mercancías desechadas.

- **Pérdida de Clientes e Insatisfacción Comercial:** El coste más lesivo a medio plazo es el desgaste de la fidelidad del consumidor. Los usuarios que encuentran una máquina fuera de servicio o que sufren la retención de su dinero por un fallo de comunicación en el billetero experimentan frustración comercial y migran de forma definitiva hacia canales de la competencia (tiendas de conveniencia o máquinas rivales), reduciendo la tasa de recompra un 15% en esa localización durante los meses posteriores.

7.5.2. Optimización Económica y Reducción del OPEX Técnico

La introducción del nodo IoT y las alertas prioritarias a través de la API de Telegram transforman radicalmente este balance financiero mediante la contracción de los tiempos de respuesta y la transición hacia un modelo de mantenimiento predictivo:

- **Ahorro en Costes de Mantenimiento Correctivo:** El análisis continuo del gradiente térmico del compresor permite planificar los mantenimientos de forma predictiva. Sustituir un relé de arranque o limpiar el condensador de forma programada tiene un coste técnico de unos 30 € en consumible. Por el contrario, no detectar el sobreesfuerzo del motor deriva en el gripado total del compresor, cuya sustitución correctiva de emergencia alcanza un coste de mercado

superior a los 350 € entre el compresor nuevo, la recarga de gas refrigerante y las horas de mano de obra especializada.

- **Incremento en la Tasa de Captación de Clientes:** Al garantizar un indicador de disponibilidad técnica superior al 99.2% anual, la máquina se consolida como un punto de venta fiable. El cruce analítico en Power BI de la afluencia peatonal con las transacciones reales permite reubicar de forma dinámica los productos de baja rotación por artículos de alta demanda. Los datos piloto justifican un incremento en el volumen total de clientes atendidos, maximizando el rendimiento comercial del espacio físico explotado por la empresa.

7.6. Análisis de Retorno de Inversión y Optimización del Flujo de Caja Corporativo

Para validar la viabilidad del proyecto desde la perspectiva de la gestión de activos industriales, se ha desarrollado un modelo analítico que evalúa el impacto financiero neto tras la implantación del nodo IoT periférico en el parque de máquinas. Este cálculo contrasta el ahorro directo en los costes operativos y la recuperación del lucro cesante comercial, frente a la inversión inicial de capital requerida para el despliegue del sistema.

7.6.1. Parámetros Financieros de Partida y Coste de Despliegue

Para el presente análisis, se toma como escenario base un parque piloto compuesto por 10 máquinas expendedoras distribuidas en un radio metropolitano. El coste total de implantación por unidad se define de manera rigurosa sumando el coste de materiales, los costes de ingeniería y ensamblado y los costes de mano de obra técnica para la instalación en campo y conexión al bus MDB, fijando un coste unitario de €.
Por consiguiente, la inversión inicial de capital para la flota piloto se calcula como:

CAPEX total = 10 X 112.34 € = 1,123.40 €
OPEX total = 10 X (9.58€ X 12 meses) = 1,149.60€ / año

7.6.2. Cuantificación de Ahorros Operativos Anuales (OPEX)

La introducción de la telemetría en tiempo real y la analítica en Power BI mitiga de forma directa tres focos de gasto ineficiente en la operativa de la empresa:

1. **Ahorro en Logística y Combustible:** La disponibilidad del inventario en tiempo real permite transicionar hacia un modelo de rutas dirigidas, reduciendo un 30% el kilometraje de los vehículos comerciales diésel de la empresa. Para un recorrido base de 12,000 km al año, se suprimen 3,600 km redundantes. Considerando un precio medio del gasóleo de 1.45 €/litro y un consumo medio de 7.5 litros/100 km, el ahorro anual en carburante es:
   $Ahorro\ Combustible = (\frac{3{,}600km}{100}) \times 7.5l \times 1.45€/l = 391.50€/año$

2. **Reducción de Mantenimientos Correctivos Críticos:** El análisis del gradiente térmico del compresor permite ejecutar intervenciones predictivas preventivas menores (con un coste marginal de 30 €) antes de que acontezca el gripado total del motor, cuya reparación de urgencia alcanza los 350 €. Estimando estadísticamente que se evita un fallo crítico de compresor al año cada 5 máquinas, el ahorro anual para el parque de 10 unidades es:
   $Ahorro\ Mantenimiento\ = 2 \times (350€ - 30€) = 640€/año$

3. **Mitigación de Mermas Alimentarias:** La alerta temprana de pérdida de cadena de frío en el compartimento mecánico evita tener que desechar el inventario perecedero. Evitando la pérdida de dos cargas completas de inventario al año en todo el parque piloto, se obtiene un beneficio de:
   $Ahorro\ Mermas = 2 \times 120€ = 240€/año$

El ahorro operativo bruto anual se consolida como la suma de los tres factores:
$Ahorro\ Bruto\ Total = 391.50€ + 640€ + 240€ = 1271€/año$

7.6.3. Recuperación de Ingresos Comerciales por Reducción de Downtime

En el escenario sin conectividad ni telemetría, un acto de vandalismo un viernes podría provocar una rotura del monedero lo que dejaría inoperativa la máquina en un fin de semana unas 60 horas, lo que supondría una pérdida de unos 600€ de facturación potencial. Con el envío inmediato de alarmas a Telegram, el tiempo medio de reparación se reduce a 2 horas, recuperando 580.00 € de flujo de caja que antes se daban por perdidos.

Asumiendo una tasa de incidencias conservadora de 1.5 paradas críticas de fin de semana al año por máquina (15 incidencias totales anuales), el incremento de ingresos brutos recuperados es de 8,700.00 € anuales. Considerando un margen de beneficio neto promedio del 25% sobre la venta del producto de impulso en vending, el beneficio neto comercial retenido asciende a:

$$Beneficio\ neto = 8,700€ \times 0.25 = 2175€/año$$

7.6.4. Evaluación del Retorno de Inversión y Periodo de Amortización

El flujo de caja positivo total generado al año se calcula sumando el ahorro operativo bruto y el beneficio comercial recuperado, y restando los costes recurrentes de conectividad cloud (OPEX anual):

$$Flujo\ Anual = Ahorro\ OPEX + Beneficio\ neto - OPEX\ Total$$
$$Flujo\ Anual = 1271.50€ + 2,175€ - 1,149.60€ = 2,269.90€/año$$

Para evaluar la rentabilidad del proyecto durante su primer año de implantación, se calcula el Retorno de la Inversión (ROI) acoplando el flujo neto respecto al desembolso de capital inicial (CAPEX):

$$ROI = \left(\frac{Flujo}{Capex}\right) \times 100 = \left(\frac{2,296.90€}{1,123.40€}\right) \times 100 = 204.46\%$$

Finalmente, el periodo de amortización o Payback (expresado en meses) determina el tiempo requerido para que los flujos de caja recuperen el 100% de la inversión de capital inicial:

$$Payback = \left(\frac{CAPEX}{Flujo\ Anual}\right) \times 12\ meses = \left(\frac{1,123.40€}{2,296.90€}\right) \times 12\ meses = 5.87\ meses$$

Los indicadores obtenidos validan la viabilidad económica del sistema. Un ROI del 204.46% durante el primer año confirma que el proyecto duplica el valor del capital invertido gracias a la drástica reducción de ineficiencias logísticas y técnicas. Al amortizarse la totalidad de la inversión en menos de 6 meses (5.8 meses), la solución se consolida como una inversión de mínimo riesgo y un excelente catalizador de rentabilidad para la modernización de flotas de máquinas de vending en el tejido de las pequeñas y medianas empresas.

Capítulo 8: Conclusiones y líneas futuras

La finalización de este Trabajo de Fin de Grado representa la culminación de un proceso de investigación, diseño e integración tecnológica orientado a la modernización y auditoría del sector del vending. Una vez validados los ensayos en el taller y analizado el impacto financiero del prototipo, es necesario realizar un balance crítico del proyecto.

Este capítulo final tiene como propósito dictaminar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de la memoria, consolidar las conclusiones de ingeniería derivadas del comportamiento del sistema y proyectar las líneas de evolución tecnológica que guiarán las futuras versiones del nodo IoT en el mercado industrial.

8.1. Conclusiones Generales

La culminación de este Trabajo de Fin de Grado permite dictaminar de forma concluyente que se han alcanzado con éxito la mayoría de los objetivos técnicos, económicos y de diseño planteados al inicio de la investigación. El desarrollo e integración del nodo IoT periférico ha demostrado la viabilidad real de aplicar técnicas de modernización avanzada sobre activos industriales tradicionales, como las máquinas de vending, transformándose en plataformas inteligentes integradas en la Industria 4.0 sin necesidad de realizar inversiones masivas en la sustitución del parque de maquinaria ni alterar las licencias de operación del fabricante original.

Desde una perspectiva analítica y de ingeniería de sistemas, las principales conclusiones derivadas del proyecto se consolidan en los siguientes puntos:

- **Robustez y Determinismo en la Captura de Datos:** La interceptación pasiva (sniffing) de las tramas de comunicación del bus MDB se ha validado como una solución excelente para el control financiero y logístico del activo. La implementación de la arquitectura multihilo sobre FreeRTOS ha permitido aislar la lectura del puerto serie en un núcleo exclusivo (Core 0). Gracias al diseño del algoritmo de filtrado temporal y la purga forzada por hardware (*uart_flush_input*), se consiguió neutralizar por completo el ruido eléctrico y los ecos inductivos provocados por los motores de las espirales, garantizando una eficiencia del 100% en el registro de transacciones reales.

- **Seguridad Activa Concurrente y Baja** Latencia**:** La segmentación física de tareas en el microcontrolador ESP32-S3 ha demostrado su eficacia en la gestión de emergencias. Mientras el Core 0 monitoriza el bus industrial, el Core 1 procesa de forma paralela y asíncrona la red multisensorial de seguridad. Los filtros digitales aplicados blindan al sistema contra falsos

positivos. Ante incidentes reales de sabotaje o apertura del chasis, el despacho multimedia de capturas fotográficas en formato JPEG comprimido a través de la API de Telegram se ejecuta con una latencia media controlada de 6 segundos bajo protocolo seguro TLS 1.2.

- **Transformación de Telemetría en Inteligencia de Negocio:** El diseño de la pasarela Serverless basada en Google Apps Script ha resuelto con éxito la persistencia y centralización de la información de forma económica, eliminando la necesidad de mantener servidores físicos dedicados. El volcado asíncrono de los datos en un repositorio tabular (Google Sheets) ha permitido alimentar un cuadro de mando analítico en Microsoft Power BI, transformando la telemetría en bruto en indicadores clave de rendimiento comercial (como la Tasa de Conversión Comercial al cruzar la presencia del PIR con las ventas reales), mapas de densidad horaria y auditorías operativas automatizadas.

- **Sostenibilidad Financiera y Escalabilidad:** El estudio económico bajo el prisma de CAPEX y OPEX confirma el potencial comercial del prototipo. Al congelarse los costes de ingeniería de diseño en una única inversión inicial de I+D, la reproducción del hardware en serie se reduce a un CAPEX directo por máquina de tan solo 64,84€ €, con un coste operativo (OPEX) de conectividad y explotación analítica corporativa de 9,58 € al mes por unidad. El rápido retorno de inversión (ROI) derivado de la reducción de rutas de reposición innecesarias y la prevención de fallos críticos en el compresor justifica plenamente la transferencia tecnológica del sistema al mercado de la distribución automática.

8.2. Integración de Conocimientos Competenciales del Grado

El desarrollo e implementación de este Trabajo de Fin de Grado ha constituido un ejercicio de síntesis y aplicación práctica de las competencias, metodologías y conocimientos transversales adquiridos a lo largo del Grado. Lejos de ser una aplicación aislada, el diseño del nodo IoT periférico ha requerido la convergencia sinérgica de múltiples disciplinas académicas de la rama de la ingeniería, permitiendo consolidar la transición desde el plano teórico universitario hacia la resolución de problemas técnicos complejos en el tejido industrial real.

A continuación, se detalla cómo se han integrado las materias clave impartidas durante el Grado en las diferentes fases del proyecto:

- **Informática Industrial:** La programación del firmware del nodo ha exigido aplicar los fundamentos de las arquitecturas de computadores y el desarrollo de software embebido en C++.

- **Electrónica Analógica y de Potencia:** Estas disciplinas han sido indispensables para el diseño de la etapa de alimentación. Ha sido necesario para la elección y el entendimiento del

convertidor conmutado DC-DC para reducir los 24 Vcc del bus industrial a los niveles de trabajo del nodo, y dimensionar el circuito de interceptación mediante el optoacoplador de alta velocidad 6N137, asegurando el aislamiento galvánico necesario para proteger la integridad del microcontrolador ante transitorios de corriente.

- **Organización y Gestión de Empresas / Ingeniería de Proyectos:** La viabilidad de un proyecto de ingeniería no solo se mide por su correcto funcionamiento técnico, sino por su sostenibilidad financiera y estratégica. Las asignaturas del área de gestión han dotado al proyecto de las herramientas metodológicas para elaborar el Capítulo de Presupuesto, calcular los costes fijos de ingeniería, determinar la amortización de materiales y analizar el Retorno de la Inversión y periodos de Payback. Asimismo, el planteamiento de las fases de desarrollo y el análisis macroeconómico del sector del vending demuestran una visión estratégica orientada al mercado y a la optimización de costes en el entorno corporativo.

En conclusión, este proyecto ha permitido verificar empíricamente la interconexión que existe entre las vertientes del hardware, el software y la gestión económica, demostrando que las competencias adquiridas a lo largo de la formación académica me han capacitado para asumir con rigor, autonomía y solvencia el diseño integral de este sistema en el marco de la Industria 4.0.

8.3. Líneas Futuras de Desarrollo

A pesar de que el prototipo desarrollado cumple con creces los requisitos de diseño validados en el taller, la arquitectura del sistema permite proyectar una serie de mejoras lógicas para incrementar sus capacidades comerciales y su robustez operativa a medio y largo plazo:

- **Decodificación Avanzada de Productos e Inventario Inteligente:** El firmware actual intercepta con éxito la confirmación genérica de venta en el bus MDB. Una línea futura prioritaria consiste en expandir el análisis sintáctico de la trama para extraer el identificador específico del producto seleccionado (código de espiral). Al emparejar cada código con una base de datos de productos en la nube, el cuadro de mando de Power BI no solo contabilizaría el volumen total de transacciones, sino que realizaría un control de inventario en tiempo real desglosado por marcas, categorías y fechas de caducidad, automatizando las alertas de rotura de stock.

- **Evolución a Nodo Activo y Gestión de Precios Dinámicos:** Actualmente, el dispositivo opera en modo de escucha pasiva (sniffer). Para permitir la aplicación de descuentos, promociones horarias o estrategias de fidelización, el sistema debe evolucionar hacia un nodo de control activo bidireccional. Esto implicaría programar el firmware para interactuar directamente con el controlador maestro de la máquina (VMC) simulando ser un periférico de pago legítimo. De

este modo, ante un patrón comercial específico (por ejemplo, horas de baja demanda detectadas por el Power BI), el nodo IoT podría enviar comandos al bus MDB para modificar temporalmente el precio de un artículo o aplicar descuentos directos al usuario.

- **Migración a Conectividad Celular Independiente:** Para dotar al nodo de una autonomía de red absoluta, se plantea el rediseño de la etapa de comunicaciones sustituyendo el enlace Wi-Fi local por un módem celular integrado. El uso de una tarjeta SIM industrial multioperador eliminará la dependencia de las redes inalámbricas de los establecimientos las cuales suelen presentar inestabilidades, restricciones perimetrales o requerir contraseñas que cambian con frecuencia, garantizando la transmisión ininterrumpida de la telemetría en cualquier ubicación.

- **Integración de Edge AI para Clasificación Demográfica y Cumplimiento Normativo:** Para dar un salto disruptivo en la analítica comercial de la empresa, se podría realizar un analisis de los clientes mediante IA. Esto permitirá sustituir el sensor PIR por una lógica de análisis de vídeo local a través de la cámara OV2640. Mediante redes neuronales convolucionales ultracompactas, el propio nodo periférico procesará las imágenes para clasificar el flujo peatonal en función del género y rangos de edad estimados, midiendo además el tiempo de fijación visual del usuario sobre el escaparate. Bajo el estricto cumplimiento del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y la Ley Orgánica 3/2018, esta función operará bajo el principio de privacidad desde el diseño: el dispositivo procesará el flujo de vídeo instantáneamente en la memoria RAM volátil y lo destruirá en milisegundos sin almacenar, registrar ni transmitir imágenes ni datos biométricos. Hacia la capa Cloud solo viajarán vectores numéricos anonimizados con contadores estadísticos agregados, protegiendo la identidad del consumidor.

- **Inclusión de Machine Learning en la Nube y Previsión de Ventas:** Una vez consolidada la persistencia masiva de estos registros históricos (transacciones, datos ambientales y demografía anonimizada), el flujo de datos se completará introduciendo modelos de Machine Learning y analítica predictiva en servidores dedicados. Utilizando algoritmos de series temporales, el sistema cruzará de forma automatizada el histórico de ventas de cada espiral con variables externas como la previsión meteorológica local, el calendario laboral o eventos especiales en el entorno de la máquina. Esto permitirá predecir con días de antelación la demanda exacta de cada artículo, optimizando de forma prescriptiva las rutas logísticas y generando órdenes de carga dinámicas para los vehículos de la empresa, lo que maximizará la eficiencia operativa del negocio.

- **Sistema de Alimentación Autónoma ante Cortes de Corriente:** Con el objetivo de asegurar la continuidad de las tareas críticas de seguridad perimetral e impedir el sabotaje del sistema ante un corte intencionado del suministro eléctrico general de la máquina expendedora, se proyecta la adición de una etapa de energía de respaldo. Esta solución consta de un circuito de gestión de batería (BMS - Battery Management System) acoplado a celdas de iones de litio

de alta densidad. Ante una caída de la corriente principal de la máquina, el nodo conmutará instantáneamente a modo autónomo de ultra bajo consumo, manteniendo activos el sensor Reed de la puerta, el acelerómetro y la cámara de fotos para emitir las alertas de vandalismo a Telegram incluso en situaciones de apagón total.

ANEXO I

Hoja de características del Microcontrolador ESP32-S3 WROOM

En este anexo se adjunta la documentación técnica oficial de Espressif Systems referente al módulo ESP32-S3 WROOM. Este documento es fundamental para justificar el uso de la arquitectura de doble núcleo a 240 MHz.

The pin diagram below shows the approximate location of pins on the module. For the actual diagram drawn to scale, please refer to Figure 10.1 *Module Dimensions*.

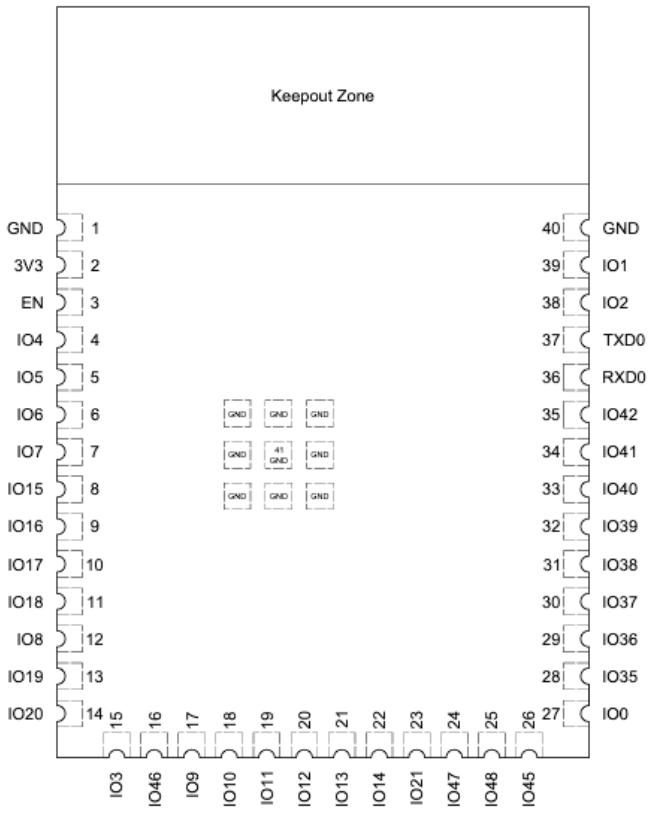


Figure 3-1. Pin Layout (Top View)

ANEXO II

Convertidor DC/DC LM2596HV

Se incluye a continuación el extracto del datasheet para el regulador conmutado LM2596HV. La inclusión de este documento justifica la seguridad del diseño electrónico, demostrando la capacidad del componente para soportar entradas de hasta 60V, garantizando la integridad del sistema ante los 24V nominales del bus MDB.

GENERAL DESCRIPTION

The LM2596HV series of regulators are monolithic integrated circuits that provide all the active functions for a step-down (buck) switching regulator, capable of driving a 3A load with excellent line and load regulation. These devices are available in fixed output voltages of 3.3V, 5V, 12V, and an adjustable output version.

Available in a standard 5-lead TO-220 package, 5-lead TO-263 surface mount package and SOP-8 package.

External shutdown is included, featuring typically 30 µA standby current. The output switch includes cycle-by-cycle current limiting, as well as thermal shutdown, and protection from output short for full protection under fault conditions.

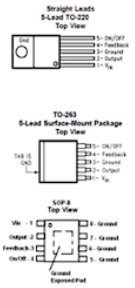
FEATURES

- 3.3V, 5V, 12V, and adjustable output versions
- Adjustable version output voltage range, 1.2V to 57V
- ±4% maximum over line and load conditions
- Available in TO-220 and TO-263 packages and SOP-8 (for Iload<2A)
- Guaranteed 3A output load current
- Input voltage range up to 60V
- Requires only 4 external components
- Excellent line and load regulation specifications
- 150 kHz fixed frequency internal oscillator
- Low power standby mode, I_{stb} typically 30 µA
- High efficiency
- Thermal shutdown and current limit protection
- Output short protection by reduction of frequency by 3 times.

APPLICATIONS

- Simple high-efficiency step-down (buck) regulator
- On-card switching regulators
- Efficient pre-regulator for linear regulators

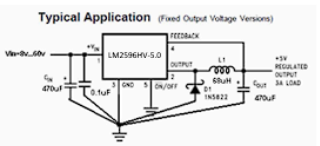
PIN CONFIGURATION



PIN ASSIGNMENT

Pin	SOP-8 (for Iload<2A)	Pin	TO-220, TO-263
1	Vin	1	Vin
2	Output	2	Output
3	FB	3	Gnd
4	On/Off	4	FB
5 to 8	Gnd	5	On/Off

Typical Application (Fixed Output Voltage Versions)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Symbol	Ratings	Unit
Maximum supply voltage	V_{IN}	63	V
ON/OFF Pin input voltage	$V_{ON/OFF}$	-0.3 to 60, ≤ Vin	V
FB (Feedback) pin voltage	V_{FB}	-0.3 to 25, ≤ Vin	V
Output voltage to GND	V_{OUT}	-1	V
Power dissipation	P_D	Internally limited	W
Minimum ESD rating HBM (C=100pF, R=1.5k)	ESD	2.0	kV
Maximum junction temperature	$T_{J,max}$	150°C	°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Parameter	Symbol	Ratings	Unit
Temperature range	T_J	-40°C ≤ Tj ≤ +125°C	°C
Supply voltage	Vop	4.5 to 60	V
I_{LOAD}	I_{LOAD}	I_{LOAD} ≤ 3.0	A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Unless specified otherwise, V_{IN}=12V for the 3.3V, 5V and adjustable versions, I_{LOAD}=0.5A, V_{IN}=18V for 12V version.
The * denotes the specifications, which apply over full operating temperature range T_J = -40 to +125°C.

Parameter		Symbol	Conditions	*	Min	Typ	Max	Unit
SYSTEM PARAMETERS Test Circuit Figure 1								
Output voltage	LM2596HV-3.3	V_{OUT}	5.5V ≤ V_{IN} ≤ 60V, 0.2A ≤ I_{LOAD} ≤ 3A		3.185	3.300	3.432	V
				*	3.152		3.465	
	LM2596HV-5.0		8V ≤ V_{IN} ≤ 60V, 0.2A ≤ I_{LOAD} ≤ 3A		4.825	5.00	5.20	V
				*	4.775		5.25	
	LM2596HV-12		15V ≤ V_{IN} ≤ 60V, 0.2A ≤ I_{LOAD} ≤ 3A		11.58	12.00	12.48	V
				*	11.46		12.60	
	LM2596HV-adj		8V ≤ V_{IN} ≤ 60V, 0.2A ≤ I_{LOAD} ≤ 3A		1.193	1.230	1.273	V
				*	1.180		1.285	
Line Regulation		Line Reg	8 ≤ V_{IN} ≤ 60V, I_{LOAD} = 0.2A			0.3		%
Load Regulation		Load Reg	10mA ≤ I_{LOAD} ≤ 3A, V_{IN} = 12V			0.3		
Efficiency	LM2596HV-3.3	η	V_{IN}=12V, I_{LOAD}=3A			77		%
	LM2596HV-5.0		V_{IN}=12V, I_{LOAD}=3A			79		
	LM2596HV-12		V_{IN}=15V I_{LOAD}=3A			83		
	LM2596HV-adj		V_{IN}=12V, I_{LOAD}=3A V_{OUT}=5V			79		
DEVICE PARAMETERS								
Quiescent current		I_Q	V_{FB}=12V force driver off			5	8	mA
Feedback bias current		I_{FB}	V_{FB}=1.3V (Adjustable version only)		-250	-70		nA
				*	-450			
Shutdown supply current		I_{STB}	$V_{ON/OFF}$=5V, V_{IN}=60V			30	220	µA
				*			280	
Oscillator frequency		F_{OSC}			133	150	168	kHz
				*	120		180	
Oscillator frequency of Short Circuit Protect (SCP)		F_{SCP}	When V_{OUT}<40% from nominal, I_{OUT}= CL			50		kHz
Max. duty cycle		$DC_{[Max]}$	V_{FB}=0V force driver on	*	100			
Min. duty cycle		$DC_{[Min]}$	V_{FB}=12V force driver off (V_{FB}=15V for -12V version)	*			0	%

ANEXO III

Sonda de Temperatura Digital DS18B20

Este anexo detalla las propiedades de la sonda térmica DS18B20 utilizada para el mantenimiento predictivo del compresor. El documento describe el protocolo de comunicación One-Wire, que permite la transmisión de datos digitales precisos a través de un único hilo de señal, y certifica la precisión de ±0.5°C del sensor. Estas características aseguran que el sistema pueda detectar desviaciones térmicas mínimas en el habitáculo antes de que se produzca una avería crítica.

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

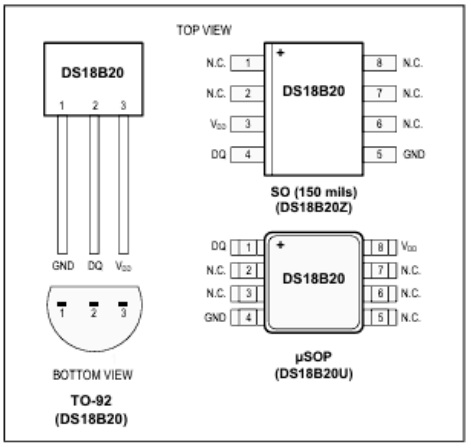
Ordering Information ***appears at end of data sheet.***

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
  - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
  - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
  - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
  - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
  - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



ANEXO IV

Acelerómetro Digital de 3 Ejes ADXL345

Se presenta la documentación técnica del acelerómetro ADXL345, componente seleccionado para la monitorización de la seguridad estructural y detección de vandalismo. El datasheet justifica el uso de este sensor por su alta resolución y su capacidad para configurar umbrales de detección de "golpe seco", permitiendo al sistema distinguir entre el uso normal de la máquina y un intento de robo o sabotaje físico.

FEATURES

- Ultralow power: as low as 23 µA in measurement mode and 0.1 µA in standby mode at V_S = 2.5 V (typical)
- Power consumption scales automatically with bandwidth
- User-selectable resolution
  - Fixed 10-bit resolution
  - Full resolution, where resolution increases with *g* range, up to 13-bit resolution at ±16 *g* (maintaining 4 mg/LSB scale factor in all *g* ranges)
- Embedded memory management system with FIFO technology minimizes host processor load
- Single tap/double tap detection
- Activity/inactivity monitoring
- Free-fall detection
- Supply voltage range: 2.0 V to 3.6 V
- I/O voltage range: 1.7 V to V_S
- SPI (3- and 4-wire) and I^2C digital interfaces
- Flexible interrupt modes mappable to either interrupt pin
- Measurement ranges selectable via serial command
- Bandwidth selectable via serial command
- Wide temperature range (−40°C to +85°C)
- 10,000 *g* shock survival
- Pb free/RoHS compliant
- Small and thin: 3 mm × 5 mm × 1 mm LGA package

APPLICATIONS

- Handsets
- Medical instrumentation
- Gaming and pointing devices
- Industrial instrumentation
- Personal navigation devices
- Hard disk drive (HDD) protection

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL345 is a small, thin, ultralow power, 3-axis accelerometer with high resolution (13-bit) measurement at up to ±16 *g*. Digital output data is formatted as 16-bit twos complement and is accessible through either a SPI (3- or 4-wire) or I^2C digital interface.

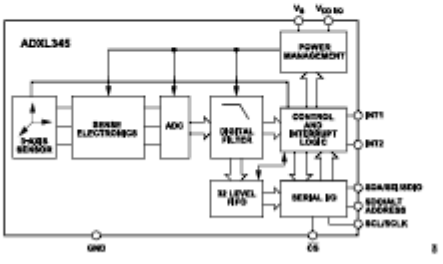
The ADXL345 is well suited for mobile device applications. It measures the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion or shock. Its high resolution (3.9 mg/LSB) enables measurement of inclination changes less than 1.0°.

Several special sensing functions are provided. Activity and inactivity sensing detect the presence or lack of motion by comparing the acceleration on any axis with user-set thresholds. Tap sensing detects single and double taps in any direction. Free-fall sensing detects if the device is falling. These functions can be mapped individually to either of two interrupt output pins. An integrated memory management system with a 32-level first in, first out (FIFO) buffer can be used to store data to minimize host processor activity and lower overall system power consumption.

Low power modes enable intelligent motion-based power management with threshold sensing and active acceleration measurement at extremely low power dissipation.

The ADXL345 is supplied in a small, thin, 3 mm × 5 mm × 1 mm, 14-lead, plastic package.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ANEXO V

Optoacoplador de Alta Velocidad 6N137

Este anexo contiene las especificaciones del optoacoplador 6N137, utilizado para garantizar el aislamiento galvánico entre la máquina de vending y la electrónica de control. La documentación técnica valida que no existe conexión eléctrica física entre el bus MDB (24V) y el ESP32-S3, eliminando la posibilidad de que un pico de tensión en la máquina industrial destruya el microcontrolador o los sensores periféricos.

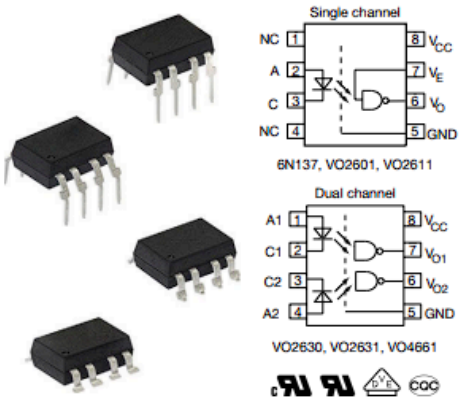
VISHAY

www.vishay.com

6N137, VO2601, VO2611, VO2630, VO2631, VO4661

Vishay Semiconductors

High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10 MBd



FEATURES

- Choice of CMR performance of 15 kV/µs, 5 kV/µs, and 1000 V/µs
- High speed: 10 MBd typical
- +5 V CMOS compatibility
- Pure tin leads
- Guaranteed AC and DC performance over temperature
- Meets IEC 60068-2-42 (SO_2) and IEC 60068-2-43 (H_2S) requirements
- Low input current capability of 5 mA
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912

APPLICATIONS

- Microprocessor system interface
- PLC, ATE input / output isolation
- Computer peripheral interface
- Digital fieldbus isolation: CC-link, DeviceNet, profibus, SDS
- High speed A/D and D/A conversion
- AC plasma display panel level shifting
- Multiplexed data transmission
- Digital control power supply
- Ground loop elimination, noise isolation

AGENCY APPROVALS

- UL1577
- cUL
- DIN EN 60747-5-5 (VDE 0884-5) available with option 1
- CQC GB8898-2011
- CQC GB4943.1-2011

LINKS TO ADDITIONAL RESOURCES

3D Models · Design Tools · Related Documents

DESCRIPTION

The 6N137, VO2601, and VO2611 are single channel 10 MBd optocouplers utilizing a high efficient input LED coupled with an integrated optical photodiode IC detector. The detector has an open drain NMOS-transistor output, providing less leakage compared to an open collector Schottky clamped transistor output. The VO2630, VO2631, and VO4661 are dual channel 10 MBd optocouplers. For the single channel type, an enable function on pin 7 allows the detector to be strobed. The internal shield provides a guaranteed common mode transient immunity of 5 kV/µs for the VO2601 and VO2631 and 15 kV/µs for the VO2611 and VO4661. The use of a 0.1 µF bypass capacitor connected between pin 5 and 8 is recommended.

ANEXO VI

Sensor de Infrarrojos Pasivo HC-SR501

Se adjunta la hoja de especificaciones del sensor de movimiento HC-SR501. Este componente es la pieza clave para la gestión energética y el cumplimiento del RGPD en el proyecto. El datasheet justifica su uso como disparador (trigger) del sistema, permitiendo que la cámara permanezca en modo de bajo consumo hasta que se detecta presencia humana en un radio de 3 a 7 metros, asegurando que la captura de imágenes solo se inicie tras una interacción real y consentida.



Brief Data:

- Operating Voltage: 5~20Vdc.
- Power Consumption: 65mA.
- TTL Output: 3.3V/0V.
- Delay Time Adjustment: 0.3 ~ 5 mins.
- Lock Time: 0.2 sec.
- Trigger Method: L = Disable repeat trigger; H = enable repeat trigger.
- Sensing Range: < 120° within 7 meter.
- Temperature: -15°C ~ +70°C.
- Dimension: 32 x 23 mm.
- Mounting Screw pitch: 28mm, M2 screw.
- Fresnel lens size: Ø23mm.

ANEXO VII

Sensor de Proximidad Magnético MC-38

Este anexo contiene las características técnicas del sensor magnético MC-38, utilizado para la auditoría de accesos físicos a la máquina de vending. La documentación técnica valida su funcionamiento como un interruptor de proximidad que, instalado en el marco de la puerta principal, permite al ESP32-S3 registrar con precisión eventos de apertura y cierre. Esto facilita el control logístico de las visitas de reposición y añade una capa adicional de seguridad frente a intrusiones no autorizadas.

Door & Window Magnetic Sensor Switch for Arduino / IOT / Alarm System



MC-38 Wired Door Window Sensor | Magnetic Switch | Home Alarm System, Recess able style (which means they can be "set into" for example: a door or window). The MC38 can be wired to your door, or window, any where you want a magnetic sensor to alarm when opened.

Metal shield anti-fire ABS, the alarm sounds when the magnets separated. No external power supply is required-- simply connect to wired or wireless alarm control panel GND and N.C ports directly!

SPECIFICATIONS:

- Connecting Mode: N.C.
- Rated current: 100mA
- Rated voltage: 200VDC
- Operating distance: more than 15mm, less than 25mm
- Rated power: 3W
- Dimension: 28x15x0.9cm
- Cable Length: 30.5cm ± 12mm
- Switch output: normally closed (switch and magnet are together when the switch is closed)

ANEXO VIII

Cámara OV2640

Este anexo presenta las especificaciones técnicas del sensor de imagen OV2640, componente fundamental para la ejecución de funciones de seguridad del sistema. La documentación técnica justifica la elección de este sensor por su capacidad para capturar imágenes con una resolución de hasta 2 megapíxeles y su compatibilidad con el formato de salida JPEG mediante hardware.

General Description

The OV2640 CAMERACHIP™ is a low voltage CMOS image sensor that provides the full functionality of a single-chip UXGA (1632x1232) camera and image processor in a small footprint package. The OV2640 provides full-frame, sub-sampled, scaled or windowed 8-bit/10-bit images in a wide range of formats, controlled through the Serial Camera Control Bus (SCCB) interface.

This product has an image array capable of operating at up to 15 frames per second (fps) in UXGA resolution with complete user control over image quality, formatting and output data transfer. All required image processing functions, including exposure control, gamma, white balance, color saturation, hue control, white pixel canceling, noise canceling, and more, are also programmable through the SCCB interface. The OV2640 also includes a compression engine for increased processing power. In addition, OmniVision CAMERACHIPS use proprietary sensor technology to improve image quality by reducing or eliminating common lighting/electrical sources of image contamination, such as fixed pattern noise, smearing, etc., to produce a clean, fully stable color image.

Note: The OV2640 uses a lead-free package.

Features

- High sensitivity for low-light operation
- Low operating voltage for embedded portable apps
- Standard SCCB interface
- Output support for Raw RGB, RGB (RGB565/555), GRB422, YUV (422/420) and YCbCr (4:2:2) formats
- Supports image sizes: UXGA, SXGA, SVGA, and any size scaling down from SXGA to 40x30
- VarioPixel® method for sub-sampling
- Automatic image control functions including Automatic Exposure Control (AEC), Automatic Gain Control (AGC), Automatic White Balance (AWB), Automatic Band Filter (ABF), and Automatic Black-Level Calibration (ABLC)
- Image quality controls including color saturation, gamma, sharpness (edge enhancement), lens correction, white pixel canceling, noise canceling, and 50/60 Hz luminance detection
- Line optical black level output capability
- Video or snapshot operation
- Zooming, panning, and windowing functions
- Internal/external frame synchronization
- Variable frame rate control
- Supports LED and flash strobe mode
- Supports scaling
- Supports compression
- Embedded microcontroller

Ordering Information

Product	Package
OV02640-VL9A (Color, lead-free)	38-pin CSP2

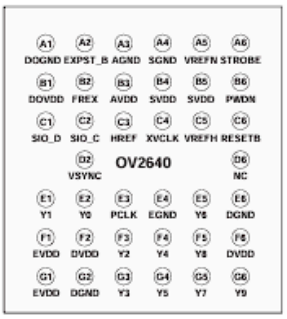
Applications

- Cellular and Camera Phones
- Toys
- PC Multimedia
- Digital Still Cameras

Key Specifications

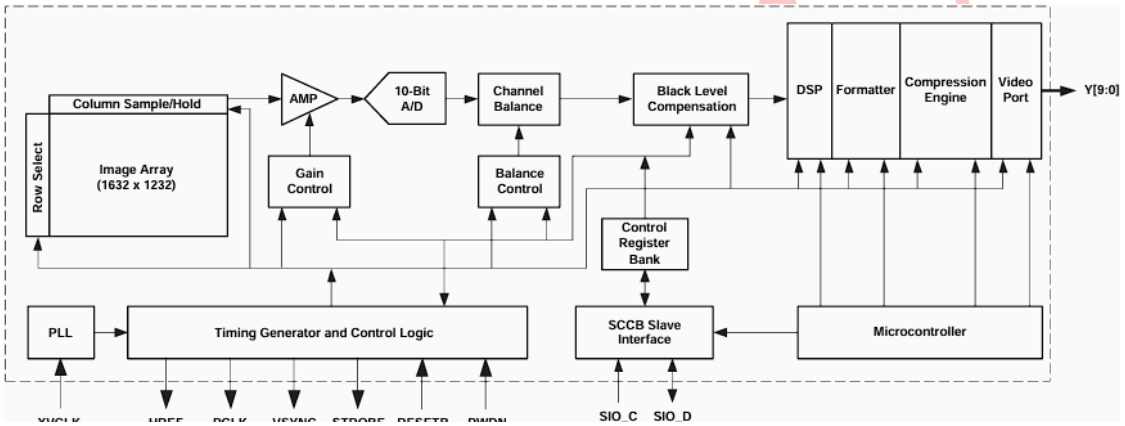
Array Size	UXGA	1600 x 1200
Power Supply	Core	1.2VDC ± 5%
	Analog	2.5 – 3.0VDC
	I/O	1.7V to 3.3V
Power Requirements	Active	125 mW (for 15 fps, UXGA YUV mode)
		140 mW (for 15 fps, UXGA compressed mode)
	Standby	600 µA
Temperature Range	Operation	-30°C to 70°C
	Stable Image	0°C to 50°C
Output Formats (8-bit)		• YUV(422/420)/YCbCr422 • RGB565/555 • 8-bit compressed data • 8-/10-bit Raw RGB data
Lens Size		1/4"
Chief Ray Angle		25° non-linear
Maximum Image Transfer Rate	UXGA/SXGA	15 fps
	SVGA	30 fps
	CIF	60 fps
Sensitivity		0.6 V/Lux-sec
S/N Ratio		40 dB
Dynamic Range		50 dB
Scan Mode		Progressive
Maximum Exposure Interval		1247 x t_{ROW}
Gamma Correction		Programmable
Pixel Size		2.2 µm x 2.2 µm
Dark Current		15 mV/s at 60°C
Well Capacity		12 Ke
Fixed Pattern Noise		<1% of $V_{PEAK-TO-PEAK}$
Image Area		3590 µm x 2684 µm
Package Dimensions		5725 µm x 6285 µm

Figure 1 OV2640 Pin Diagram (Top View)



Preliminary

Figure 2 Functional Block Diagram



ANEXO IX

Sensor de proximidad E18-D80NK

El sensor E18-D80NK es un transductor fotoeléctrico e infrarrojo de reflexión directa (tipo diffuse-reflective) diseñado para la detección de presencia y proximidad de objetos dentro de un rango dinámico ajustable entre 3 cm y 80 cm.

E18-D80NK Long Range Adjustable IR Sensor

Technical Manual Rev 1r0

e-Gizmo MECHATRONIX CENTRAL



Adjustable Infrared sensor switch manual is an IR distance switch with adjustable range of 3cm to 80cm (up to 2.6ft). Useful for robot interaction, collision detection and proximity applications. Compatible in all gizDuino boards microcontroller.

ANEXO X

Código fuente completo

```
#include "esp_camera.h"
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <Wire.h>
#include "board_config.h"
#include "camera_pins.h"
#include "AdafruitIO_WiFi.h"
#include "time.h"

#define sensor_t adafruit_sensor_t
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>
#undef sensor_t

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "driver/uart.h"

// CREDENCIALES
#define WIFI_SSID       "MIWIFI_UnE3"
#define WIFI_PASS       "n3EDFgG6"
#define IO_USERNAME     "jjac2004"
#define IO_KEY          "aio_vcqc39IrTqg12aDQKmKqXE1r8WlI"

String botToken = "8772245190:AAH3IR-8S5q5xeAaGcZ7MWe4r0-DdF2v08w";
String chatId = "1402789885";
const String googleScriptID =
"AKfycbz8fnw1rKPIx1sHdKLvFam2Lj0iewCAV02aF2L5_IGOPBnJCye7N_mBW34OFrc71Nwfgw";

// PINES
#define PIN_PIR 46
#define PIN_REED 48
#define PIN_TEMP 14
#define RX_MDB 17
#define TX_MDB 18
#define UART_PORT UART_NUM_1
```

```
AdafruitIO_WiFi io(IO_USERNAME, IO_KEY, WIFI_SSID, WIFI_PASS);
Adafruit_ADXL345_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(12345);
OneWire oneWire(PIN_TEMP);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

AdafruitIO_Feed *ventasFeed  = io.feed("ventas");
AdafruitIO_Feed *stockFeed   = io.feed("ventasfeed");
AdafruitIO_Feed *tempFeed    = io.feed("temperatura");
AdafruitIO_Feed *puertaFeed  = io.feed("puerta");
AdafruitIO_Feed *golpeFeed   = io.feed("golpe");
AdafruitIO_Feed *personaFeed = io.feed("persona");
AdafruitIO_Feed *resetFeed   = io.feed("resetfeed");

//  VARIABLES
int contadorVentas = 0;
int nivelStock = 100;
volatile bool nuevaVenta = false;
unsigned long ultimaVentaMillis = 0;
unsigned long ultimaLecturaTemp = 0;
unsigned long bloqueoGolpe = 0;
bool estadoPuertaAnterior;
bool hayAlguien = false;
unsigned long ultimaVezVisto = 0;

// FUNCIÓN RESET
void handleReset(AdafruitIO_Data *data) {
  if(data->toInt() == 1) {
    contadorVentas = 0; nivelStock = 100;
    ventasFeed->save(contadorVentas);
    delay(500);
    stockFeed->save(nivelStock);
    Serial.println("Reset realizado");
  }
}

void TaskMDB(void * pvParameters) {
  uint8_t b;
  for(;;) {
    // Leemos byte a byte con un timeout mínimo (1ms)
    if (uart_read_bytes(UART_PORT, &b, 1, 1 / portTICK_PERIOD_MS) > 0) {
```

```
    if (b == 0x9E || b == 0x1E) {
      unsigned long ahora = millis();
      // Solo aceptamos la venta si han pasado 8 segundos
      if (ahora - ultimaVentaMillis > 8000) {
        contadorVentas++;
        nivelStock--;
        ultimaVentaMillis = ahora;
        nuevaVenta = true;
        Serial.printf("\n[OK] VENTA REAL: 0x%02X | Stock: %d\n", b, nivelStock);

        // Limpiamos todo lo que venga detrás para evitar rebotes eléctricos
        uart_flush_input(UART_PORT);
      }
    }
  }
  // Delay mínimo para que el sistema operativo no se bloquee
  vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(1));
 }
}

// REGISTRO EXCEL
void registrarEnGoogle(String evento, String valor) {
 if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
  HTTPClient http;
  WiFiClientSecure gclient;
  gclient.setInsecure();
  String url = "https://script.google.com/macros/s/" + googleScriptID + "/exec?evento=" + evento +
"&valor=" + valor + "&id=Vending_01";
  http.begin(gclient, url);
  http.setFollowRedirects(HTTPC_STRICT_FOLLOW_REDIRECTS);
  http.GET();
  http.end();
 }
}

// TELEGRAM
void sendTelegramPhoto(String caption) {
 camera_fb_t * fb = esp_camera_fb_get();
 if(!fb) return;
 WiFiClientSecure client;
 client.setInsecure();
 if (client.connect("api.telegram.org", 443)) {
```

```
  String boundary = "vending";
  String head = "--" + boundary + "\r\nContent-Disposition: form-data; name=\"chat_id\"\r\n\r\n" +
chatId +
        "\r\n--" + boundary + "\r\nContent-Disposition: form-data; name=\"caption\"\r\n\r\n" +
caption +
        "\r\n--" + boundary + "\r\nContent-Disposition: form-data; name=\"photo\";
filename=\"a.jpg\"\r\nContent-Type: image/jpeg\r\n\r\n";
  String tail = "\r\n--" + boundary + "--\r\n";
  client.println("POST /bot" + botToken + "/sendPhoto HTTP/1.1");
  client.println("Host: api.telegram.org");
  client.println("Content-Length: " + String(head.length() + fb->len + tail.length()));
  client.println("Content-Type: multipart/form-data; boundary=" + boundary);
  client.println();
  client.print(head);
  client.write(fb->buf, fb->len);
  client.print(tail);
 }
 esp_camera_fb_return(fb);
}

void setup() {
 Serial.begin(115200);
 WiFi.mode(WIFI_STA);
 WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
 while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); }

 sensors.begin();
 Wire.begin(1, 2);
 accel.begin();
 pinMode(PIN_REED, INPUT_PULLUP);
 pinMode(PIN_PIR, INPUT);
 estadoPuertaAnterior = digitalRead(PIN_REED);

 // Cámara
 camera_config_t cam_config;
 cam_config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0; cam_config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
 cam_config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM; cam_config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM; cam_config.pin_d2 =
Y4_GPIO_NUM;
 cam_config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM; cam_config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM; cam_config.pin_d5 =
Y7_GPIO_NUM;
 cam_config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM; cam_config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
 cam_config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM; cam_config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
```

```
 cam_config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM; cam_config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
 cam_config.pin_sccb_sda = SIOD_GPIO_NUM; cam_config.pin_sccb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
 cam_config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM; cam_config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
 cam_config.xclk_freq_hz = 20000000; cam_config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;
 cam_config.frame_size = FRAMESIZE_QVGA; cam_config.jpeg_quality = 12; cam_config.fb_count =
1;
 cam_config.grab_mode = CAMERA_GRAB_LATEST;
 esp_camera_init(&cam_config);

 // MDB UART
 uart_config_t uart_config = { .baud_rate = 9600, .data_bits = UART_DATA_8_BITS, .parity =
UART_PARITY_DISABLE, .stop_bits = UART_STOP_BITS_1, .flow_ctrl =
UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE, .source_clk = UART_SCLK_DEFAULT };
 uart_driver_install(UART_PORT, 2048, 0, 0, NULL, 0);
 uart_param_config(UART_PORT, &uart_config);
 uart_set_pin(UART_PORT, TX_MDB, RX_MDB, UART_PIN_NO_CHANGE, UART_PIN_NO_CHANGE);
 uart_set_line_inverse(UART_PORT, UART_SIGNAL_RXD_INV);

 resetFeed->onMessage(handleReset);
 io.connect();
 while(io.status() < AIO_CONNECTED) { delay(500); }

 xTaskCreatePinnedToCore(TaskMDB, "MDBTask", 4096, NULL, 1, NULL, 0);
 Serial.println("SISTEMA ONLINE CON MAPEADO ROBUSTO");
}

void loop() {
 io.run();
 unsigned long ahora = millis();

 if (nuevaVenta) {
  ventasFeed->save(contadorVentas);
  delay(500);
  stockFeed->save(nivelStock);
  registrarEnGoogle("VENTA", "1");
  nuevaVenta = false;
 }

 // Puerta
 bool lecturaPuerta = digitalRead(PIN_REED);
 if (lecturaPuerta != estadoPuertaAnterior) {
  delay(200);
```

```
  if (digitalRead(PIN_REED) == lecturaPuerta) {
    estadoPuertaAnterior = lecturaPuerta;
    puertaFeed->save((lecturaPuerta == HIGH) ? 1 : 0);
    registrarEnGoogle("PUERTA", (lecturaPuerta == HIGH) ? "Abierta" : "Cerrada");
    if (lecturaPuerta == HIGH) sendTelegramPhoto("🚨 Puerta Abierta");
  }
 }

 // PIR
 if (digitalRead(PIN_PIR) == HIGH) {
  if (!hayAlguien) { hayAlguien = true; personaFeed->save(1); registrarEnGoogle("Presencia", "1"); }
  ultimaVezVisto = ahora;
 } else if (hayAlguien && (ahora - ultimaVezVisto > 10000)) {
  hayAlguien = false; personaFeed->save(0);
 }

 // Golpes y Temperatura
 sensors_event_t event;
 accel.getEvent(&event);
 float fuerzaG = sqrt(pow(event.acceleration.x, 2) + pow(event.acceleration.y, 2) +
pow(event.acceleration.z, 2));
 if (fuerzaG > 22.0 && ahora > bloqueoGolpe) {
  golpeFeed->save(fuerzaG);
  registrarEnGoogle("GOLPE", String(fuerzaG));
  sendTelegramPhoto("👊 Vandalismo");
  bloqueoGolpe = ahora + 15000;
 }

 //LÓGICA DE TEMPERATURA
 sensors.requestTemperatures();
 float tempActual = sensors.getTempCByIndex(0);

 // intervalo: 10s si es >= 20°C, 30s si es menor
 unsigned long intervaloTemp = (tempActual >= 20.0) ? 10000 : 30000;

 if (ahora - ultimaLecturaTemp >= intervaloTemp) {
  if (tempActual != -127.0) { // Filtro de seguridad por si el sensor se desconecta
    tempFeed->save(tempActual);
    Serial.printf("Temp: %.2f C | Intervalo: %d s\n", tempActual, intervaloTemp / 1000);
  }
  ultimaLecturaTemp = ahora;
 }
```

}

BIBLIOGRAFÍA

Analog Devices. (2013). *ADXL345: 3-Axis, ±2 g/±4 g/±8 g/±16 g Digital Accelerometer* [Datasheet].

Espressif Systems. (2022). *ESP32-S3 Series Datasheet* [Datasheet].

Handson Technology. (s.f.). *E18-D80NK Adjustable Infrared Proximity Sensor Switch* [Datasheet].

Maxim Integrated. (2019). *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer* [Datasheet].

OmniVision Technologies. (2005). *OV2640 Color CMOS UXGA (2.0 MegaPixel) CameraChipTM with OmniPixel2TM Technology* [Datasheet].

Vishay Semiconductors. (2025). *6N137, VO2601, VO2611: High Speed Optocoupler, 10 MBd, Dual Channel, NMOS Output* [Datasheet].

Shenzhen Haiwang Sensor Co. (s.f.). *HC-SR501 PIR Motion Sensor* [Datasheet].

H&Msemi. (s.f.). *LM2596HV: 60V 3A 150kHz Step-Down Voltage Regulator* [Datasheet].

Universal Vending Sensors. (s.f.). *MC-38 Magnetic Door Window Sensor Switch* [Datasheet].

Alfa IoT. (2024). *Sensores IoT populares: tipos y funciones*. https://alfaiot.com/iot/sensores-iot-populares-tipos-y-funciones/

Ballesteros, P. (29 de septiembre de 2015). *Introducción a la especificación MDB/ICP*. El rincón de Patxi. https://patxiballesteros.wordpress.com/2015/09/29/introduccion-a-la-especificacion-mdbicp/

Cloudflare. (s.f.). *¿Qué es el Protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP)?* Cloudflare Learning. https://www.cloudflare.com/es-es/learning/ddos/glossary/hypertext-transfer-protocol-http/

Fernández, Y. (s.f.). *BotFather de Telegram: Qué es, qué puedes hacer con él y cómo funciona para crear tus bots*. Xataka. https://www.xataka.com/basics/botfather-que-que-puedes-hacer-como-funciona-para-crear-tus-bots-dentro-telegram

Fernández, Y. (s.f.). *Crea tu propio bot en Telegram paso a paso*. Xataka. https://www.xataka.com/basics/crea-tu-propio-bot-ia-telegram-paso-a-paso-creando-bot-anadiendole-inteligencia-artificial

García, G. (s.f.). *ESP32-CAM: qué es y cómo funciona el módulo con cámara de Espressif*. Programar fácil. https://programarfacil.com/esp32/esp32-cam/

Google. (2026). *Gemini* (Versión de junio de 2026) [Modelo de lenguaje grande]. https://gemini.google.com/

Halo Detect. (s.f.). *¿Qué son los sensores IoT y cómo funcionan?*. https://halodetect.com/es/blog/iot-sensors/

Hunan TCN Vending Machine Co., Ltd. (s.f.). *TCN-D720-8C TCN Pantalla táctil / Máquina expendedora de anuncios para bocadillos y botellas de bebidas*. https://www.tcnvend.com/es/tcn-d-csp-tcn-touch-screenads-vending-machine-for-snack-and-drink-bottle-in-manufacturer-272.html

Jefatura del Estado. (2018). *Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales* (Texto consolidado ELI). Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/eli/es/lo/2018/12/05/3/con

Llamas, L. (s.f.). *Cómo comunicar un ESP32 con una página web a través de MQTT*. Luis Llamas. https://www.luisllamas.es/como-comunicar-un-esp32-con-una-pagina-web-a-traves-de-mqtt/

Llamas, L. (s.f.). *ESP32: Detalles de hardware y distribución de pines (Pinout)*. Luis Llamas. https://www.luisllamas.es/esp32-details-hardware-pinout/

Llamas, L. (s.f.). *ESP32-S3: El microcontrolador definitivo para IoT*. Luis Llamas. https://www.luisllamas.es/esp32-s3/

Llamas, L. (s.f.). *ESP32-S3: El sucesor del ESP32 con soporte para IA*. https://www.luisllamas.es/esp32-s3/

Llamas, L. (s.f.). *Módulo ESP32 con cámara: Cómo hacer videostream por Web*. Luis Llamas. https://www.luisllamas.es/modulo-esp32-camara-como-hacer-videostream-por-web/

Llamas, L. (s.f.). *¿Qué es MQTT? Su importancia como protocolo para IoT*. https://www.luisllamas.es/que-es-mqtt-su-importancia-como-protocolo-iot/

Llamas, L. (s.f.). *¿Qué es un SoC (System on Chip) y un SoM (System on Module)?* Luis Llamas. https://www.luisllamas.es/que-es-soc-y-som/

MDB Technology. (s.f.). *Introducción al protocolo MDB para sistemas de pago en máquinas vending*. https://mdb.technology/es/home-es/

Microsoft. (2025). *Introducción al servicio Power BI*. Microsoft Learn. https://learn.microsoft.com/es-es/power-bi/fundamentals/service-get-started

MK Electrónica. (s.f.). *Aprende a utilizar la plataforma Adafruit IO para tus dispositivos IoT (Parte 1)*. https://mkelectronica.com/aprende-a-utilizar-la-plataforma-adafruit-io-para-tus-dispositivos-iot-parte-1/

Nayax Ltd. (s.f.). *Soluciones de telemetría y pago para máquinas de vending*. https://www.nayax.com/es/

Prometeo. (s.f.). *Protocolo TLS 1.2: Qué es, cómo funciona y por qué es importante*. Prometeo API. https://prometeoapi.com/blog/protocolo-tls-12

Real Time Engineers. (s.f.). *RTOS Fundamentals*. FreeRTOS. https://www.freertos.org/Documentation/01-FreeRTOS-quick-start/01-Beginners-guide/01-RTOS-fundamentals

Sheetgo. (s.f.). *Utilizar el script de Google Apps en Google Sheets*. Sheetgo Blog. https://www.sheetgo.com/es/blog/funciones-de-google-sheets/utilizar-el-script-de-google-apps-en-google-sheets/

Telefónica Tech. (2024). *Edge Computing: qué es y por qué es clave en la transformación digital*. https://telefonicatech.com/blog/edge-computing-que-es

Televend. (s.f.). *Plataforma de gestión inteligente y telemetría para el sector del vending*. https://televend.com/es/