

Diseño de un Sistema Electrónico para el Monitoreo y Optimización de Puntos de Acopio de
Residuos en Bucaramanga

William Andrés Ariza Villamizar y Juan David Suarez Corzo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electrónico

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster en Potencia Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria.

Este logro está dedicado con todo mi corazón a mi familia. A mi padre, cuyo apoyo incondicional ha sido una fuente constante de motivación durante todo este proceso. Su paciencia y confianza en mí han sido muy importantes para llegar hasta aquí, me siento profundamente agradecido por su apoyo, sin dudar en ningún momento de mis capacidades.

A mi madre, quien, a pesar de la distancia, nunca dejó de estar pendiente de mi bienestar y siempre me escuchó. Su constante preocupación y su apoyo emocional me han dado la fortaleza para seguir adelante y dar lo mejor de mí, incluso en los momentos más difíciles.

A ambos, gracias por su amor incondicional, por su confianza y por ser mi pilar a lo largo de este camino.

Y por supuesto, a mi hermanito, a quien quiero mucho y a quien espero poder servir de ejemplo e inspiración para que piense en su futuro y se motive a estudiar y prepararse, tal como ustedes lo han hecho conmigo.

William Andres Ariza Villamizar.

En esta etapa final de un largo camino lleno de adversidades, quiero dedicar este logro a todas aquellas personas que dieron su aporte para poder ser hoy un ingeniero electrónico íntegro:

A mis madres Maria y Ady, quienes en vida hicieron hasta lo imposible para poder realizar este sueño. Con su comprensión, bondad y amor incondicional siempre me guiaron por el camino que hoy considero el correcto.

A mis amigos, seres queridos y demás familiares, quienes confiaron en este arduo proceso y que han contribuido a mi crecimiento personal.

Que este proyecto sea una prueba más del amor humano.

Juan David Suarez Corzo.

Agradecimientos.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes siempre estuvieron a mi lado a lo largo de todo este proceso, brindándome su apoyo incondicional y una paciencia infinita. Su confianza en mí ha sido fundamental para llegar hasta aquí, y les estoy profundamente agradecido por su amor y orientación.

También deseo agradecer a mis amigos Luis David, Nicolás y Omar. Sin su apoyo, este camino habría sido mucho más largo y complicado. Sus buenos hábitos, disciplina en el estudio, y, sobre todo, su amistad y constante apoyo me empujaron a ser más responsable y a mantenerme enfocado. Gracias por siempre estar ahí, por ayudarme a seguir adelante, y por motivarme a dar lo mejor de mí.

William Andres Ariza Villamizar.

Agradezco enormemente a mi alma mater, la Universidad Industrial de Santander, por ser el lugar perfecto para poder cumplir este objetivo, donde pude formarme profesionalmente y donde pude conocer personas que hicieron realidad este sueño.

A mi familia, quienes siempre me motivaron en los momentos más difíciles, su constante apoyo, comprensión y amor incondicional fueron clave para cruzar este camino.

Por último, a todas aquellas personas que, de uno u otro modo, siempre me hicieron sentir agradecido.

En los momentos buenos y malos siempre tuve personas que me hicieron tener otra perspectiva de la vida, siempre tuve alguien que me extendiera la mano y a quienes siempre estaré agradecido al ser parte de mi crecimiento profesional, personal y, sobre todo, a ser una mejor persona.

Juan David Suarez Corzo.

Tabla de Contenidos

Introducción	11
1.Objetivos	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
2.Conceptos Previos	14
2.1. Puntos de acopio de residuos urbanos y contenedores típicos	14
2.1.1. <i>Problemáticas operativas en puntos de acopio</i>	15
2.1.2. <i>Variables físicas relevantes en puntos de acopio de residuos</i>	16
2.2. Tecnologías para la medición de nivel de llenado	16
2.2.1. <i>Tecnologías para la medición de peso en contenedores</i>	17
2.3. Internet de las Cosas (IoT)	18
2.3.1. <i>Arquitectura de sistemas IoT</i>	18
2.4. Comunicación celular en sistemas IoT	19
2.4.1. <i>Plataformas de procesamiento en sistemas IoT</i>	20
2.5. Gestión del consumo energético en sistemas embebidos	20
3.Metodología	21
3.1. Enfoque metodológico	21
3.2. Definición del problema y requisitos del sistema	21
3.3. Diseño conceptual del sistema IoT	24
3.4. Selección de sensores y tecnologías	26
3.4.1. <i>Selección del sistema de medición de peso</i>	26
3.4.2. <i>Selección del sistema de medición de nivel</i>	27
3.4.3 <i>Selección de la tecnología de comunicación</i>	29
3.4.4 <i>Selección de la plataforma de procesamiento.</i>	30
3.5. Arquitectura hardware del prototipo	31
3.5.1. <i>Medición de peso</i>	31
3.5.2. <i>Medición de nivel</i>	32
3.5.3. <i>Actuación y señalización</i>	32
3.5.4. <i>Comunicación</i>	32
3.5.5. <i>Alimentación</i>	33
3.6. Gestión de datos	35
3.6.1. <i>Automatización y almacenamiento de los datos</i>	35
3.6.2. <i>Visualización de la información</i>	38
3.7. Desarrollo del código del sistema	39

3.7.1. Inicialización y direccionamiento de sensores VL53L1X	40
3.7.2. Lectura del peso con HX711 y tratamiento de ruido	40
3.7.3. Cálculo del porcentaje de llenado	41
3.7.4. Lógica de control de compuertas	41
3.7.5. Modo operador (despertar por botón)	42
3.7.6. Envío de datos por SMS y formato del mensaje	43
3.7.7. Gestión energética en firmware: turnoff módem y deep sleep	43
3.8. Prueba, validación y ajustes iterativos	43
3.8.1. Primeras pruebas	44
3.8.2. Pruebas en cuarto de aseo, cambio en la base de datos y visualización	47
3.8.3. Últimas pruebas para la lógica de control de acceso	50
3.9. Costos del prototipo	51
4. Conclusiones	52
5. Recomendaciones	53
Referencias	54

Lista de figuras

Figura 1 Contenedores urbanos típicos y representación del prototipo a escala.....	15
Figura 2 Celda de peso de 50kg.	17
Figura 3 Evidencia del Problema en Bucaramanga.	22
Figura 4 Ejemplo de disposición de los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS)...	23
Figura 5 Sensor de Distancia VL53L1X.	28
Figura 6 Pinout de la tarjeta LilyGO T-A7670E R2.	31
Figura 7 Esquema general de conexiones del sistema electrónico del prototipo.	34
Figura 8 Prototipo del sistema de medición con tres contenedores.	34
Figura 9 Flujo creado en Zapier para la gestión de los datos del sistema.	36
Figura 10 Interfaz de Firestore y visualización de registros en la base de datos.	37
Figura 11 Diagrama de flujo del procesamiento y visualización de los datos obtenidos.	38
Figura 12 Visualización del estado de llenado y peso de los contenedores del prototipo	39
Figura 13 Salida por consola de la inicialización y lectura de sensores VL53L1X.....	40
Figura 14 Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.	42
Figura 15 Sección de código de los parámetros configurables del modo deep sleep.	43
Figura 16 Fragmento de código de las variables calibración de VL53L1X.	47
Figura 17 Prueba del sistema en un cuarto de aseo.....	48
Figura 18 Estado del contenedor durante la prueba de medición de nivel.	49
Figura 19 Pruebas del sistema durante la validación de la lógica de control de acceso..	51

Lista de tablas

Tabla 1 Comparativa de características de sensores de distancia.....	27
Tabla 2 Asignación de pines GPIO del sistema.....	33
Tabla 3 Identificación de los componentes del prototipo de medición del sistema.....	35
Tabla 4 Resultados de pruebas de exactitud y dispersión del sensor VL53L1X.	44
Tabla 5 Resultados de pruebas de exactitud y dispersión en la medición de peso.	45
Tabla 6 Tabla de costos finales de dispositivos del prototipo.	51

Lista de apéndices

Apéndice A. Carpeta drive del proyecto en Google Drive57

Resumen

Título: Diseño de un Sistema Electrónico para el Monitoreo y Optimización de Puntos de Acopio de Residuos en Bucaramanga*

Autores: William Andres Ariza Villamizar, Juan David Suarez Corzo**

Palabras Clave: Puntos de acopio, Gestión de residuos, IoT, Monitoreo remoto, Internet de las cosas.

Descripción:

El proyecto Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS) aborda la gestión inadecuada de los residuos sólidos urbanos en sectores periféricos de la ciudad, donde los puntos de acopio carecen de monitoreo y control, lo que genera impactos negativos ambientales, sanitarios y sociales. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema IoT (Internet de las cosas) para el monitoreo y control de dichos puntos de acopio, integrando sensores de nivel basados en tecnología de medida por tiempo de vuelo, celdas de carga con módulos de acondicionamiento de señal y un sistema de procesamiento embebido. Además, el sistema permite el control de acceso a las canastas y la transmisión de datos a plataformas externas a través de mensajes SMS.

El prototipo fue diseñado para operar de manera autónoma con bajo consumo energético, adecuado para entornos con infraestructura eléctrica variable y acceso a redes de comunicación celular. Durante el desarrollo, se realizaron pruebas en condiciones controladas y escenarios similares a la implementación real, permitiendo ajustes iterativos en hardware y software. Los resultados obtenidos validan la viabilidad técnica de la solución, demostrando su potencial para mejorar la gestión de los residuos sólidos urbanos, ofreciendo una base tecnológica escalable y adaptable a futuros desarrollos en el contexto de ciudades inteligentes.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Jaime Guillermo Barrero Perez

Abstract

Title: Design of an Electronic System for the Monitoring and Optimization of Waste Collection Points in Bucaramanga*

Authors: William Andres Ariza Villamizar, Juan David Suarez Corzo**

Keywords: Collection points, Waste management, IoT, Remote monitoring, Internet of Things.

Description:

The Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS) project addresses the inadequate management of urban solid waste in peripheral areas of the city, where collection points lack monitoring and control, leading to negative environmental, sanitary, and social impacts. This work presents the design and implementation of an IoT (Internet of Things) system for monitoring and controlling these waste collection points, integrating level sensors based on time-of-flight measurement technology, load cells with signal conditioning modules, and an embedded processing system. Additionally, the system allows access control to the bins and data transmission to external platforms via SMS messages.

The prototype was designed to operate autonomously with low energy consumption, suitable for environments with variable electrical infrastructure and access to cellular communication networks. During development, tests were conducted in controlled conditions and real-world-like scenarios, enabling iterative adjustments in both hardware and software. The results validate the technical feasibility of the proposed solution, demonstrating its potential to improve urban solid waste management, providing a scalable and adaptable technological foundation for future developments within smart cities.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Jaime Guillermo Barrero Perez

Introducción

La gestión adecuada de los residuos sólidos urbanos es uno de los principales desafíos ambientales en las ciudades, especialmente en barrios o zonas periféricas donde las condiciones de acceso y la infraestructura dificultan la óptima prestación de los servicios de recolección. Los puntos de acopio comunitarios cumplen un papel muy importante al permitir almacenar los residuos sólidos domiciliarios, sin embargo, presenta problemas asociados a falta de control, monitoreo y el uso adecuado de estos.

En la ciudad de Bucaramanga y particularmente en barrios periféricos se ha podido observar que estos puntos de acopio carecen de mecanismos que permitan conocer de manera oportuna el estado de llenado de sus contenedores. Esto genera desbordamientos constantemente, dispersión de residuos, malos olores, presencia de lixiviados y proliferación de vectores. Además, la ausencia de información obliga a que la gestión se haga de una manera reactiva, generando más costos y reduciendo la eficiencia del trabajo.

Como respuesta a esta problemática, surge el proyecto Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS), el cual propone una reimaginación de los puntos de acopio tradicionales a partir de espacios cerrados, con acceso controlado y orientados a promover la separación de residuos. Para que esta propuesta sea viable y efectiva, resulta necesario incorporar un sistema que permita monitorear el estado de los contenedores, facilite el control de acceso y proporcione información oportuna a las entidades encargadas de la recolección.

En este marco, el presente trabajo de grado tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema electrónico basado en tecnologías IoT (Internet de las cosas) para el monitoreo y control de puntos de acopio de residuos sólidos urbanos, específicamente aplicado al contexto de los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles en Bucaramanga. El sistema propuesto integra sensores de nivel y peso, capacidades de procesamiento local, mecanismos

de control lógico y una estrategia de comunicación remota que permite transmitir la información a plataformas externas para su almacenamiento y visualización.

Este trabajo presenta el proceso de diseño, implementación y validación del prototipo desarrollado, así como los resultados obtenidos, las limitaciones identificadas y las oportunidades de mejora, sentando las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el área de la gestión inteligente de residuos urbanos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Diseñar un sistema electrónico para mejorar la eficiencia en la recolección y la gestión de residuos mediante el uso de sensores y tecnología de comunicación en tiempo real en puntos de acopio de residuos en Bucaramanga.

1.2. Objetivos específicos

Seleccionar e integrar sensores de peso y de nivel que permitan determinar el llenado en los tres contenedores de un punto de acopio, para prevenir su desbordamiento.

Implementar una aplicación que permita el monitoreo en tiempo real del llenado de los contenedores en un punto de acopio, para facilitar la recolección oportuna de los residuos sólidos.

Validar el funcionamiento del prototipo a través de pruebas en un entorno controlado, midiendo la efectividad de los sensores y la automatización del sistema.

2. Conceptos Previos

2.1. Puntos de acopio de residuos urbanos y contenedores típicos

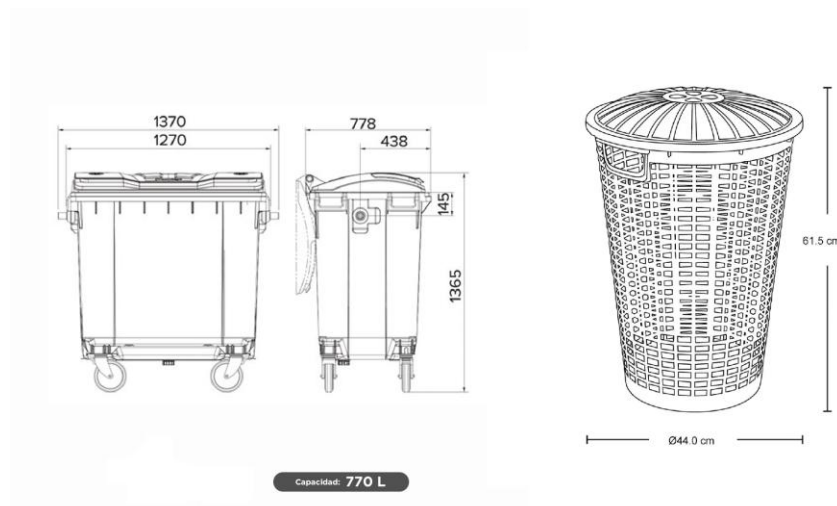
Los puntos de acopio de residuos sólidos urbanos son infraestructuras utilizadas para el almacenamiento temporal de residuos sólidos urbanos y domiciliarios especialmente en sectores donde el acceso de camiones de basura es limitado. Estos puntos están conformados por uno o varios contenedores de gran capacidad en espacios abiertos o semiabiertos y son utilizados por la comunidad alrededor de manera continua.

En contextos urbanos los contenedores comunes presentan capacidades que van entre 660 L y 1100 L, con alturas aproximadas entre 1,2 m y 1,5 m, dependiendo del fabricante. Estas dimensiones influyen directamente en las variables que son relevantes para su monitoreo como lo son el nivel de llenado.

Es importante aclarar que el presente proyecto no se desarrolla directamente sobre contenedores de tamaño real, sino sobre un prototipo a escala diseñado para representar condiciones funcionales principales de los puntos de acopio propuestos en el proyecto **Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS)**. Esto permite evaluar la viabilidad técnica del sistema de monitoreo y control sin caer en los costos y complejidades relacionados a una implementación a escala real (SINTRASERVIPUBLICOS, 2024).

Figura 1

Contenedores urbanos típicos y representación del prototipo a escala.



Nota: Mercado Libre. (s/f).

2.1.1. Problemáticas operativas en puntos de acopio

Los puntos de acopio de residuos sólidos comunitarios urbanos presentan problemáticas operativas que afectan la eficiencia de la recolección y el entorno. Entre los principales problemas se encuentran:

- La acumulación excesiva de residuos por la falta de información oportuna sobre el nivel de llenado, lo que genera desbordamientos y exposición de residuos en el ambiente. Esta situación favorece la dispersión de desechos, generación de lixiviados e incremento de riesgos ambientales y sanitarios.

El acceso no controlado a los contenedores que permite la manipulación indebida de los residuos, deteriorando la limpieza y el orden de los puntos de acopio, alargando también los tiempos y costos del servicio de recolección (SINTRASERVIPUBLICOS, 2024).

2.1.2. Variables físicas relevantes en puntos de acopio de residuos

Para una gestión eficiente de los puntos de acopio de residuos sólidos urbanos, es fundamental contar con información que permita conocer el estado de los contenedores de manera periódica. Entre las variables más relevantes se encuentran:

- **Nivel de llenado**, que indica el volumen ocupado por los residuos dentro del contenedor.
- **Peso de los residuos**, que permite estimar la carga total almacenada y complementar la información obtenida por el nivel.

El monitoreo de estas variables hace posible identificar condiciones críticas de llenado, la optimización de las rutas de recolección y la reducción de impactos negativos asociados al desbordamiento de residuos, como la contaminación del entorno y la proliferación de vectores.

2.2. Tecnologías para la medición de nivel de llenado

La medición del nivel de llenado en contenedores de residuos puede abordarse mediante diversas tecnologías. Entre las utilizadas se encuentran los sensores ultrasónicos y los sensores basados en tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF) (Botella Puig, A. (2023)).

Los sensores ultrasónicos emplean ondas acústicas para estimar la distancia entre el sensor y la superficie de los residuos. Sin embargo, su desempeño puede verse afectado por la geometría del contenedor, la presencia de bordes cercanos y las características del material a medir.

Por otro lado, los sensores ToF utilizan luz infrarroja para calcular la distancia a partir del tiempo que tarda el pulso luminoso en reflejarse en el objeto. Esta tecnología presenta ventajas en términos de precisión y estabilidad frente a superficies irregulares. Estudios como el realizado por **Hais et al. (2025)** reportan errores inferiores al **1,7 % en rangos de hasta 4**

m, lo que los hace adecuados para aplicaciones de medición de nivel en contenedores de residuos urbanos.

2.2.1. Tecnologías para la medición de peso en contenedores

El peso de los residuos representa una variable complementaria al nivel de llenado, ya que aporta información más precisa del estado del contenedor. Una solución ampliamente utilizada para este fin es el empleo de celdas de carga, dispositivos basados en galgas extensiométricas dispuestas comúnmente en una configuración de puente de Wheatstone (Paredes, A. E., Valenzuela, A. J. (2021))

Las celdas de carga comerciales se encuentran entre 20 kg y 50 kg para aplicaciones de pequeña y mediana escala. Estas celdas de carga junto con convertidores analógico-digitales especializados, como el HX711, son capaces de obtener mediciones de peso con buena resolución y estabilidad.

Dado que este trabajo corresponde a un prototipo a escala, se seleccionaron celdas de carga de 50 kg, distribuidas estratégicamente para soportar la estructura de medición. Esta elección resulta suficiente para representar el comportamiento del sistema sin necesidad de implementar sensores de rango industrial, lo cual habría incrementado significativamente los costos del proyecto.

Figura 2

Celda de peso de 50kg.



2.3. Internet de las Cosas (IoT)

Los sistemas IoT son aquellos que mediante la toma de datos con sensores se encargan de procesar y analizar de forma local o remota esa información para entregar señales a dispositivos que forman parte del mundo real. Los sistemas IoT también se encargan de reconocer eventos, cambios y pueden actuar de forma autónoma y apropiada.

A pesar de que comúnmente se le relaciona con dispositivos electrodomésticos y bienes de consumo como *wearables* o coches inteligentes interconectados, la gran mayoría de las aplicaciones IoT se encuentran en todos los sectores industriales. Sensores de energía interconectados digitalmente para empresas suministradoras de gas y petróleo, sistemas de seguimiento de vehículos y paquetes para empresas de transporte y logística y también dispositivos de monitorización, diagnóstico y tratamiento en la medicina (Barrio, 2022).

2.3.1. Arquitectura de sistemas IoT

La arquitectura de los sistemas IoT comúnmente está conformada de varias capas funcionales que permiten organizar componentes y procesos que hacen parte de la adquisición, transmisión, procesamiento y análisis de la información, estas capas son:

- **Capa 1. Sensores y actuadores**

Esta capa es el nivel físico del sistema y la conforman los sensores que se encargan de tomar datos de magnitudes físicas o químicas como temperatura, intensidad lumínica, composición química, distancia, peso, tensión, etc. Además de actuadores que a partir de una señal eléctrica ejecutan una acción determinada, de esta manera sensores y actuadores supervisando y controlando ayudan a automatizar un proceso.

- **Capa 2. Sistemas de adquisición de datos**

En esta capa se encuentran dispositivos responsables de recibir las señales que vienen de los sensores y convertirlos en datos digitales. Dispositivos basados en microcontroladores o sistemas embebidos que integran módulos ADC (Convertidor analógico-digital), interfaces de comunicación con sensores (I2C, SPI, UART o entradas analógicas) y capacidad de procesamiento local para filtrar, calibrar y asegurar que los datos que se van a enviar a las capas superiores sean confiables.

- **Capa 3. Análisis en la frontera**

Muchas veces la cantidad de datos que se toman y deben ser enviados son una cantidad tal que deben ser procesados y comprimidos para reducir el volumen antes de ser enviados a la nube. Este análisis lo hacen nodos *IoT*, *gateways* o dispositivos de *edge computing* con el objetivo de optimizar el uso del ancho de banda y disminuir la carga de procesamiento en la nube.

- **Capa 4. Análisis en el centro de datos o en la nube**

En esta última se encuentran equipos más complejos como servidores de aplicaciones, procesamiento, máquinas virtuales (VM) y contenedores (Docker) que permiten almacenar grandes cantidades de información. Esto para ser puesta a disposición de empresas que la estudian e interpretan para detectar patrones de comportamiento o anomalías (Universidad Internacional de La Rioja, 2023).

2.4. Comunicación celular en sistemas IoT

Las redes celulares son una de las principales tecnologías utilizadas en IoT para el envío de información a largas distancias (Sánchez, 2019). Las redes celulares permiten conectar dispositivos ubicados en zonas apartadas o con una infraestructura limitada aprovechando la amplia cobertura proporcionada por los operadores de telecomunicaciones.

En IoT principalmente se usan las tecnologías de comunicación para enviar datos de monitoreo, alertas y estados del sistema a plataformas remotas, permitiendo el acceso a esa información en tiempo real. Esto es adecuado para aplicaciones donde no es viable el uso de redes cableadas o locales, como sistemas de monitoreo ambiental, gestión de residuos o control de infraestructura distribuida.

2.4.1. Plataformas de procesamiento en sistemas IoT

Los sistemas de monitoreo y control para aplicaciones IoT requieren plataformas de procesamiento capaces de integrar múltiples sensores, gestionar la adquisición de datos y soportar mecanismos de comunicación y ahorro energético. En este contexto, los **microcontroladores** han sido ampliamente adoptados debido a su flexibilidad y bajo consumo. Entre las plataformas más utilizadas se encuentra el **ESP32**, un microcontrolador que integra capacidades de procesamiento, múltiples interfaces de comunicación y soporte para modos avanzados de bajo consumo. Estas características lo hacen una opción adecuada para sistemas IoT que operan de manera autónoma y requieren optimizar el uso de la energía disponible (Hercog et al., 2023).

2.5. Gestión del consumo energético en sistemas embebidos

Una característica importante en aplicaciones IoT es la gestión eficiente del consumo energético. Los microcontroladores modernos, como el ESP32, incorporan distintos modos de operación que permiten reducir significativamente el consumo cuando el sistema no se encuentra realizando tareas.

El **modo Deep Sleep** permite desactivar la mayor parte de los periféricos del microcontrolador, manteniendo únicamente los elementos necesarios para reactivar el sistema ante eventos específicos. Esta estrategia resulta útil en aplicaciones de monitoreo periódico, donde las mediciones no requieren ejecutarse de forma continua.

3. Metodología

3.1. Enfoque metodológico

Este proyecto se desarrolló incrementalmente, basado principalmente en la construcción progresiva del prototipo final funcional. Esto permitió validar continuamente cada decisión de diseño que se plantea, identificar los problemas técnicos rápidamente e ir realizando ajustes iterativos durante el proceso.

El trabajo fue pasando por etapas desde la concepción inicial de la solución, selección de tecnologías, diseño de la arquitectura del sistema, la implementación del prototipo hasta finalmente la realización de pruebas y ajustes finales. Durante todo este proceso se fue llevando un registro de ideas, hipótesis, problemas encontrados y soluciones propuestas, lo que permitió la trazabilidad del desarrollo y la justificación de las decisiones técnicas tomadas.

3.2. Definición del problema y requisitos del sistema

De acuerdo con lo que se expone en el proyecto Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS), en veintiún barrios periféricos de la ciudad de Bucaramanga se evidencia la ausencia de mecanismos de control y monitoreo en los contenedores de los puntos de acopio de residuos domiciliarios y urbanos. Estos puntos de acopio consisten en contenedores al aire libre que se encargan de servir como depósito de residuos domiciliarios y urbanos del sector donde se encuentran, ya que son lugares de difícil acceso para los camiones de basura.

Como consecuencia del libre acceso que la gente tiene a estos contenedores y a cualquier hora del día, estos contenedores son utilizados de manera inadecuada. Además, por falta de información oportuna de su nivel de llenado, la gestión de la empresa encargada de la recolección de estos residuos suele ser reactiva y poco eficiente.

Figura 3

Evidencia del Problema en Bucaramanga.



Nota. (SINTRASERVIPUBLICOS (2024).

Los contenedores suelen desbordarse, recicladores informales suelen destapar las bolsas de basura y botarlas en el piso contaminando todo el entorno. Los malos olores que estos puntos terminan expulsando al ambiente, lixiviados y la propagación de animales como ratas en estos espacios, convierten estos puntos en un problema para las comunidades cercanas.

El proyecto Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS) propone como solución una reimaginación de estos puntos de acopio, convirtiéndolos en lugares con un acceso controlado para facilitar su uso adecuado, encerrado para evitar la liberación de olores y químicos contaminantes al ambiente e inteligentes para un funcionamiento autónomo, monitoreable y que permita conocer el estado del punto para gestionar oportunamente la recogida de los residuos sólidos presentes.

El diseño de los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS) consiste en un cuarto de aseo construido en cemento o un container de metal que se encarga de encerrar el espacio del punto de acopio y sus canastas. Mediante ventanillas ubicadas en la pared frente a las canastas y que se abren de afuera hacia adentro del cuarto de aseo, el usuario tendrá acceso a la canasta correspondiente para depositar la basura. Como los PLUS buscan también facilitar la

separación de los residuos para que exista la posibilidad de reciclarlos y tener un impacto ambiental, cada una de las tres canastas en el punto estará designada para un tipo específico de basura, una para aprovechables, una para residuos orgánicos y una para residuos no aprovechables. Por último, estos nuevos puntos de acopio contarán con sensores de nivel y peso, y un sistema que se encargará de favorecer el correcto uso de este como también el monitoreo del estado actual de las canastas para que como resultado surjan mejores estrategias de recolección oportuna de los residuos por parte de la empresa encargada.

Figura 4

Ejemplo de disposición de los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS)



Conociendo lo que son los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS) y como se propone funcionar, el sistema inteligente que se encargará de controlar y tomar los datos de su estado debe tener unos requisitos funcionales específicos que son:

- El sistema debe medir el nivel de llenado de cada contenedor de manera periódica.
- El sistema debe permitir el control del acceso a los contenedores mediante mecanismos de apertura y cierre.

- El sistema debe transmitir los datos recopilados a un sistema externo para su monitoreo y análisis.
- El sistema debe operar de forma autónoma, sin intervención constante del usuario.
- El sistema debe generar información que permita identificar condiciones de llenado crítico.

Además de los requisitos funcionales, el sistema debe cumplir también una serie de requisitos no funcionales y restricciones debido al entorno en el que se piensa implementar:

- Bajo consumo energético, ya que los puntos de acopio pueden ubicarse en entornos con infraestructura eléctrica limitada o de calidad variable.
- Escalabilidad, de modo que la solución pueda adaptarse a un mayor número de puntos de acopio.
- Simplicidad operativa, permitiendo que el sistema sea utilizado y mantenido por personal no especializado.

Estos requisitos orientaron las decisiones de diseño tomadas durante el desarrollo del prototipo, incluyendo la selección del hardware y los sensores empleados, la implementación del software de control y adquisición de datos, la elección de la plataforma de procesamiento, el diseño de los mecanismos de comunicación y la incorporación de estrategias de bajo consumo energético.

3.3. Diseño conceptual del sistema IoT

El sistema desarrollado es una solución IoT para el monitoreo y control de puntos de acopio de residuos sólidos urbanos más específicamente dentro de lo que se va a construir con el proyecto PLUS. Conceptualmente el sistema se organiza como un grupo de componentes físicos y lógicos que interactúan entre ellos para adquirir información de su entorno, tomar

decisiones localmente y enviar esos datos a plataformas externas para su supervisión. Sabiendo esto podemos estructurar el sistema en tres capas funcionales: Capa de percepción, capa de procesamiento y control y capa de comunicación y gestión de la información, tomando el enfoque que se usa normalmente en arquitecturas IoT (Universidad Internacional de La Rioja, 2023).

- **Capa de percepción:**

En la capa de percepción se encuentran los sensores de nivel de llenado y de peso que son los encargados de medir el estado físico de los contenedores del punto de acopio y permiten obtener información sobre la cantidad de residuos que hay depositados en cada canasta. La información que se recolecta en esta capa es la base para la toma de decisiones del sistema.

- **Capa de procesamiento y control:**

En la capa de procesamiento y control se encuentra el dispositivo que actúa como nodo IoT y que es el responsable de la adquisición periódica de las señales de los sensores, procesamiento local de sus datos y la ejecución de acciones de control sobre los mecanismos de acceso a los contenedores cuando se detectan ciertas condiciones de llenado.

Esta capa integra la lógica de operación autónoma del sistema, tomando en cuenta las estrategias de adquisición de datos y toma de decisiones. Además del manejo de la energía, esto es fundamental ya que los puntos de acopio pueden ubicarse en entornos con infraestructura eléctrica limitada o de calidad variable.

- **Capa de comunicación y gestión de la información:**

La capa de comunicación y de gestión de la información es el medio o como el sistema va a transmitir los datos hacia un sistema externo para su monitoreo y análisis. Esta capa

permite que la información generada en la capa anterior sea accesible remotamente facilitando la toma de decisiones oportuna por parte de la empresa encargada de la gestión de los residuos.

Se busca la implementación de una plataforma de almacenamiento de datos que sea accesible mediante interfaces web para presentar de forma clara el estado del sistema.

3.4. Selección de sensores y tecnologías

La selección de los sensores y tecnologías para el prototipo se hizo principalmente considerando las condiciones reales de los puntos de acopio PLUS, las variables que se iban a medir asociadas a nivel y peso, el entorno de los contenedores, los requisitos funcionales y no funcionales que se mencionaron anteriormente y el costo de los componentes.

3.4.1. Selección del sistema de medición de peso

Para la medición del peso se decidió usar celdas de carga de 50kg en lugar de utilizar los sensores de peso comunes que se usan en las balanzas comerciales. Esto para tener un margen de peso grande para probar y mantener la precisión.

Con el objetivo de distribuir bien la carga y aumentar la capacidad total en la báscula que se iba a construir, se diseñó una estructura de soporte en la que se pusieron una celda de carga en cada esquina de la plataforma que sostenía la canasta para alcanzar una capacidad de carga de aproximadamente 200 Kg. Esta distribución además de proporcionar suficiente capacidad de carga para las pruebas también permitía una buena estabilidad mecánica y reducía posibles errores en las medidas que se pudieran dar por distribuciones raras del peso en la plataforma.

La selección del módulo HX711 como interfaz de adquisición se hizo debido a su alta resolución, su amplio uso documentado con microcontroladores en aplicaciones de peso y sistemas embebidos (Paredes, A. E., Valenzuela, A. J. (2021)).

3.4.2. Selección del sistema de medición de nivel

Para la selección del sensor adecuado para medir el nivel de llenado (El más importante) se evaluaron varias tecnologías de sensor a distancia, entre esos ultrasónicos y ópticos de tiempo de vuelo (ToF). En principio se pensó en el VL53L0X principalmente por su bajo costo y facilidad de adquisición. Sin embargo, mirando su utilización en estudios previos, pudimos conocer sus limitaciones frente a superficies poco reflectantes como bolsas plásticas, menor alcance y menor robustez en el procesamiento en comparación con su sucesor el VL53L1X que también utiliza el principio de medición por tiempo de vuelo pero con mejoras, dependiendo menos del color, textura o reflectividad del material medido y teniendo un mayor alcance. Esto encaja perfecto en este proyecto ya que en los contenedores de basura predominan las bolsas plásticas, materiales irregulares y superficies no homogéneas (STMicroelectronics, 2022).

Se evaluó la posibilidad también de utilizar sensores ultrasónicos, pero en las aplicaciones que se encontraron se podía apreciar que requerían de una geometría más controlada del entorno para funcionar correctamente, comúnmente se colocaban muy cerca de la boca del tanque o directamente en la tapa para que su lectura diera directamente con la basura ya que si los bordes de la canasta eran alcanzados por la lectura podían generar reflexiones múltiples que afectarían la precisión de la medida (Mollenedo & Alonso, 2020).

Tabla 1

Comparativa de características de sensores de distancia.

Característica	VL53L1X	VL53L0X	HC-SR04	TCRT5000
Principio de medición	Tiempo de vuelo (ToF) por láser	Tiempo de vuelo (ToF) por láser IR	Tiempo de vuelo ultrasónico	Reflexión infrarroja

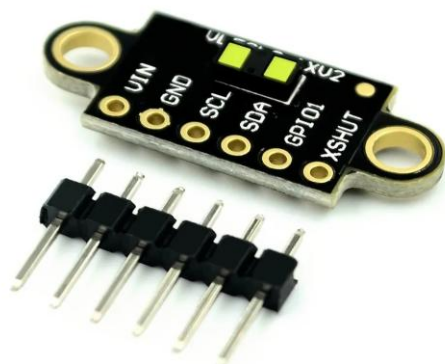
Rango típico de medición	Hasta 4 m	Hasta 2 m	Hasta 4 m	<2 cm
Precisión	±5 mm	±3-5mm	±3mm*	No dice
Influencia del ambiente	Leve sensibilidad a la luz ambiente	Sensibilidad a la luz ambiente	Sensible al viento, humedad y geometría	Alta sensibilidad a la luz ambiente
Campo de visión	Ajustable	Fijo (~25°)	Amplio	Muy reducido
Consumo energético	~20 mA	~20 mA	~15 mA	~30 mA

Nota. A partir de estas características comparativas, se seleccionó el sensor VL53L1X para la medición de distancia en el proyecto.

A partir de estas características de la **Tabla 1**, se seleccionó el sensor VL53L1X para la medición del nivel de los contenedores del sistema PLUS. También fue de gran importancia el estudio de porcentaje de error en las medidas del VL53L1X presentada en el estudio de Hais, Y. R., Hamganisyah, F. I., Saputra, E., & Pathoni, H. (2025).

Figura 5

Sensor de Distancia VL53L1X.



Nota. Mercado Libre. (s. f.)

3.4.3 Selección de la tecnología de comunicación

Dado que los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS) están pensados para ser ubicados en un punto central en barrios periféricos de la ciudad de Bucaramanga y no dispondrán necesariamente de acceso a redes Wi-Fi locales, se tuvo que evaluar la implementación de otras tecnologías de comunicación inalámbrica y de una cobertura amplia en entornos urbanos para transmitir los datos del sistema hacia las plataformas externas.

Primero se consideró el uso de la tecnología LoRa (Long Range), que ha venido utilizándose cada vez más en IoT por su extremadamente bajo consumo y su capacidad de transmisión a largas distancias. Sin embargo, estudios realizados muestran que LoRa funciona mejor en entornos amplios con pocos obstáculos y desniveles en el terreno. En ciudades o en un sistema como el que se pensaba implementar que consiste en mandar señales de un punto lejano periférico de la ciudad a uno central en todo el sector urbano se vuelve necesario el uso de *gateways* para garantizar que no se pierdan paquetes (Pasolini et al., 2018; Andrade & Yoo, 2019).

Esto se volvía algo mucho más difícil de implementar y poner a prueba por la logística y el tener que buscar lugares por la ciudad donde se pudiera instalar lo necesario. Como segunda opción se evaluó el uso de NB-IoT (Narrowband IoT) que también tienen un bajo consumo energético y una mayor penetración en entornos urbanos (Baena-Navarro et al., 2025). Sin embargo, las operadoras que ofrecen este servicio no vendían estas tarjetas SIM a particulares y por el contrario ofrecían el servicio en paquetes o planes para empresas.

Finalmente, se decidió usar LTE Cat-1, una tecnología que también es utilizada en el ámbito IoT. LTE Cat-1 se pueden implementar con tarjetas SIM convencionales, utilizando la cobertura del operador, siendo efectivo para entornos urbanos y suburbanos.

Se eligió entonces una plataforma basada en un microcontrolador ESP32 con un módem LTE Cat-1 integrado. con el objetivo de implementar la transmisión de datos mediante SMS, una tecnología que sigue estando bien soportada y que es adecuada para enviar información de bajo volumen. De esta forma se garantiza la operación del sistema en entornos urbanos y periurbanos con cobertura celular disponible.

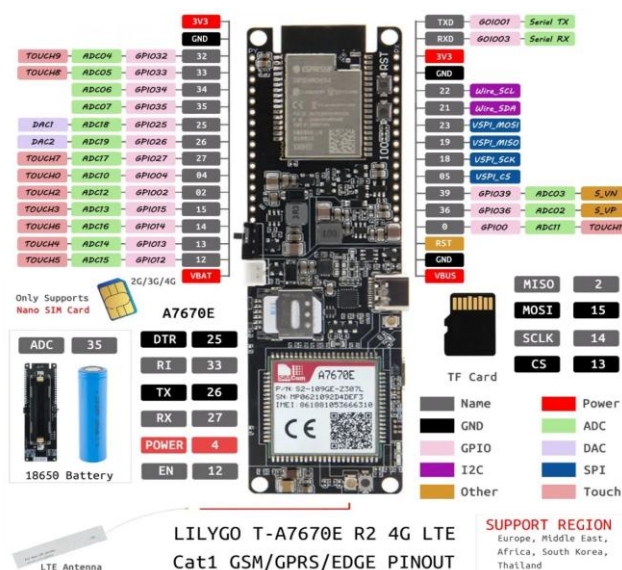
3.4.4 Selección de la plataforma de procesamiento.

Para el desarrollo del sistema se decidió utilizar la tarjeta LilyGO T-A7670E R2, que es una tarjeta de desarrollo que integra un microcontrolador ESP32 con un módem LTE Cat-1 en un solo dispositivo. El ESP32 es ampliamente utilizado en aplicaciones IoT, por la disponibilidad de múltiples interfaces de comunicación (I²C, SPI, UART y GPIO) y también porque brinda soporte nativo a modos de bajo consumo como *deep sleep* que son esenciales para aplicaciones alimentadas con batería. La tarjeta LilyGO incluye un *socket* para baterías Li-ion 18650, junto a circuitería integrada para la gestión básica de carga y alimentación.

En cuanto al desarrollo de software, la LilyGO es programable desde el entorno Arduino, lo que facilitó mucho la programación e implementación del *firmware* del sistema, disponibilidad de librerías, documentación para los sensores y la depuración del código durante el desarrollo y validación del prototipo.

Figura 6

Pinout de la tarjeta LilyGO T-A7670E R2.



Nota. Tomado de LilyGO (2023).

3.5. Arquitectura hardware del prototipo

El hardware del sistema se estructura alrededor de la unidad principal de procesamiento de datos y ejecución de la lógica de control, la LilyGO A-7670E, a esta tarjeta van conectados los sensores, los leds encargados de simular una señal hacia un actuador y el módulo LTE. Esta arquitectura posibilita la integración de varias funciones del sistema en un solo nodo IoT autónomo.

3.5.1. Medición de peso

Para la medición de peso de los contenedores se construyó una plataforma de pesaje con cuatro celdas de carga de 50kg conectadas en configuración puente de Wheatstone y hacia un módulo HX711.

Cada módulo HX711 se comunica con el microcontrolador mediante una interfaz digital (Arduino) permitiendo la lectura precisa de las variaciones de peso incluso en rangos

elevados. De esta forma se estima el peso total del contenedor a partir de las lecturas, ofreciendo un dato complementario al nivel de llenado.

3.5.2. Medición de nivel

El nivel de llenado lo miden los sensores VL53L1X ubicados en la parte superior de cada canasta. Estos utilizan la tecnología ToF para calcular la distancia desde el sensor hasta los residuos.

Los sensores se conectan con la LilyGO a través de I²C, utilizando pines de habilitación (XSHUT) para asignarle a cada uno una dirección propia y que todos se pueda comunicar sin interferirse entre ellos sobre el mismo bus. Así se simplifica un poco el cableado y se permite usar menos pines del microprocesador.

3.5.3. Actuación y señalización

El sistema está diseñado para que cuando un contenedor esté al 90% de su capacidad bloquee la trampilla de acceso que le corresponde y cuando esté a menos del 85% se desbloquee. Para simular esto, se conectan tres leds, uno para cada canasta, de tal forma que permite ver si el sistema de control está funcionando correctamente, bloqueando y desbloqueando el acceso cuando corresponde.

3.5.4. Comunicación

Una vez que se toman los datos el módem LTE Cat-1 A7670E integrado en la tarjeta se comunica con el ESP32 a través de una interfaz UART y permite el envío de mensajes SMS utilizando una tarjeta SIM convencional. (LilyGO, 2023)

Con el fin de reducir el coste energético del proceso, el módem solo se prende en el momento que es necesario y se apaga apenas termina su función.

3.5.5. Alimentación

El sistema fue diseñado para tener la posibilidad de operar mediante una batería Li-ion, permitiendo su funcionamiento en entornos donde la infraestructura eléctrica puede presentar limitaciones o variaciones en su disponibilidad. La tarjeta LilyGO tiene circuitos de regulación y gestión de energía que facilitan la alimentación tanto del microcontrolador como del módem celular. (LilyGO, 2023).

La arquitectura de la tarjeta también hace posible la implementación de una estrategia de bajo consumo a nivel de *firmware*, como suspensión profunda del ESP32 para reducir el gasto entre periodos en los que no se está midiendo.

Tabla 2

Asignación de pines GPIO del sistema.

Pin (Dispositivo)	LilyGO – A-7670E
(LED_CONTENEDOR1)	GPIO 19
(LED_CONTENEDOR2)	GPIO 15
(LED_CONTENEDOR3)	GPIO 2
DT1 (HX711)	GPIO 39
DT2 (HX711)	GPIO 34
SCK1 (HX711)	GPIO 18
SCK2 (HX711)	GPIO 23
XSHUT1 (VL53L1X)	GPIO 14
XSHUT2 (VL53L1X)	GPIO 32
XSHUT3 (VL53L1X)	GPIO 13
SDA (VL53L1X)	GPIO 21

SCL (VL53L1X)	GPIO 22
A (PULSADOR)	GPIO 33

Figura 7

Esquema general de conexiones del sistema electrónico del prototipo.

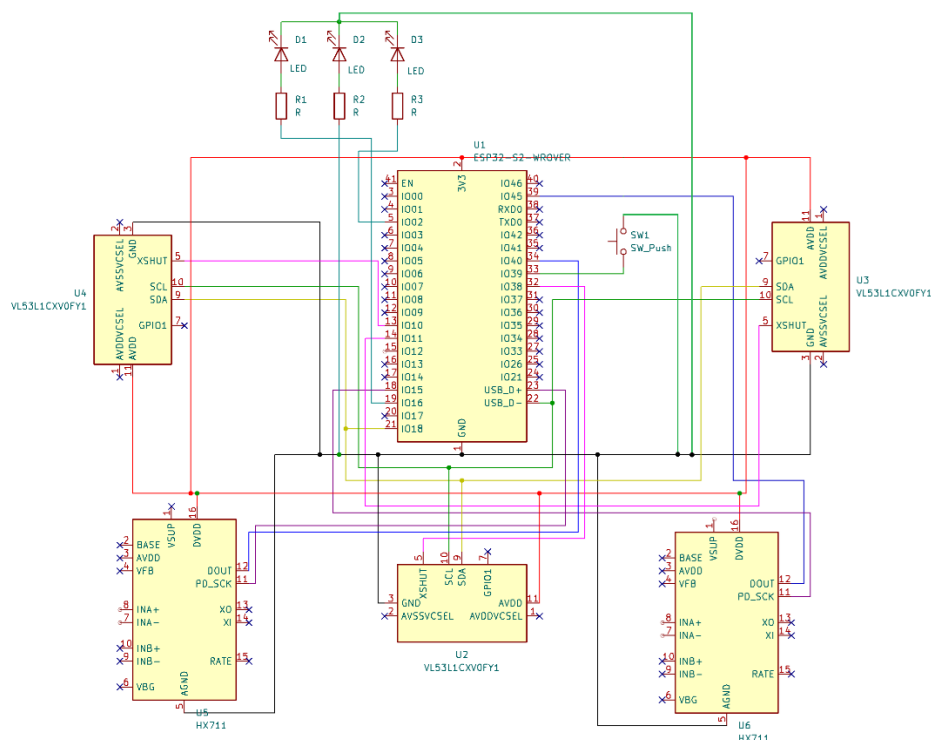


Figura 8

Prototipo del sistema de medición con tres contenedores.

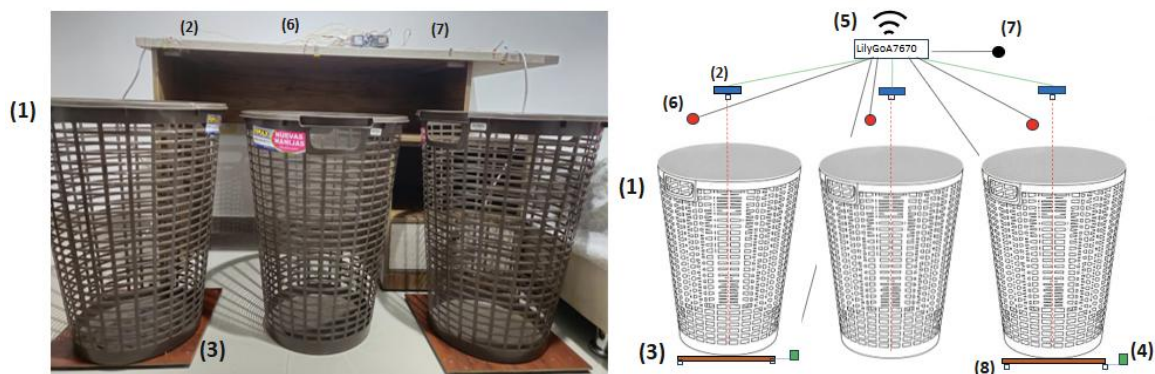


Tabla 3

Identificación de los componentes del prototipo de medición del sistema.

Numero	Componente
1	Canasta/Contenedor
2	VL53L1X
3	Plataforma de peso
4	HX711
5	LilyGOA7670
6	Led
7	Pulsador
8	Celda de peso

Nota: La numeración corresponde a los elementos señalados en la Figura 8.

3.6. Gestión de datos

Posterior a que los datos sean tomados y transmitidos mediante SMS los mensajes llegan a la plataforma SMSMobileAPI, esta es una aplicación móvil que convierte el celular en una pasarela de comunicación entre la red celular y los servicios en la nube. Esta aplicación guarda los SMS que llegan al teléfono y los carga a una API para que la información pueda ser utilizada para diferentes propósitos en la nube. (SMSMobileAPI, 2023).

3.6.1. Automatización y almacenamiento de los datos

Una vez que los mensajes son cargados a la API de SMSMobileAPI, estos, a su vez, son tomados por la plataforma de automatización Zapier. Esta plataforma permite enlazar y establecer flujos entre distintos servicios de manera automática sin infraestructura compleja.

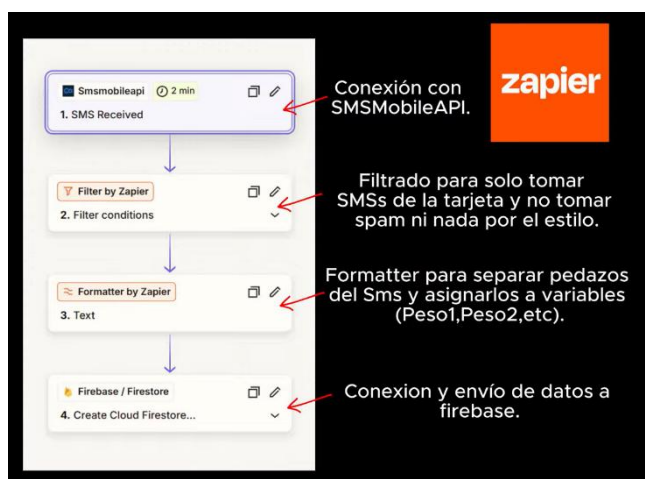
Con Zapier:

- Se extraen los valores numéricos de los SMS que llegan con demás caracteres.
- Se estructuran los datos según el formato definido para el sistema.
- Se envía automáticamente la información hacia una base de datos en la nube.

Lo que hace Zapier aquí es conectarse con la API y extraer su información cada que llega un nuevo mensaje. Zapier tiene herramientas para extraer datos en un mensaje de texto, mediante filtros y herramientas de formato. Por lo tanto, para facilitar su tarea los SMS del sistema se envían así “1234 | 5678 | 91011 | 12131 | 41516”, correspondiendo cada uno de esos valores respectivamente a Peso1, Peso2, Distancia1, Distancia2, Distancia3. Los datos del sistema se envían de esta manera para que Zapier pueda obtener sus datos con una herramienta de formateo que adquiere la información del SMS que esté separada por un “|” de esta manera luego se pueden enviar los datos organizados y etiquetados con su respectiva variable a una base de datos en la nube para ser utilizados.

Figura 9

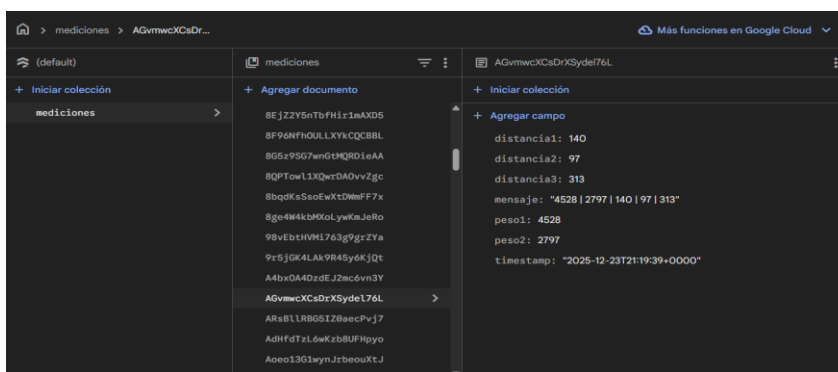
Flujo creado en Zapier para la gestión de los datos del sistema.



3.6.1.1. Firebase. La base de datos en la nube utilizada para este proyecto fue Firestore. Firebase es una plataforma de desarrollo de google que permite construir aplicaciones web brindando múltiples herramientas. Entre esas herramientas está Firestore que es una base de datos que es gratis hasta cierto límite de uso, (Google, s.f.) para efectos de diseño y pruebas del prototipo del proyecto se utilizó por ser suficiente, ser una herramienta muy útil, globalmente aceptada y utilizada.

Figura 10

Interfaz de Firestore y visualización de registros en la base de datos.

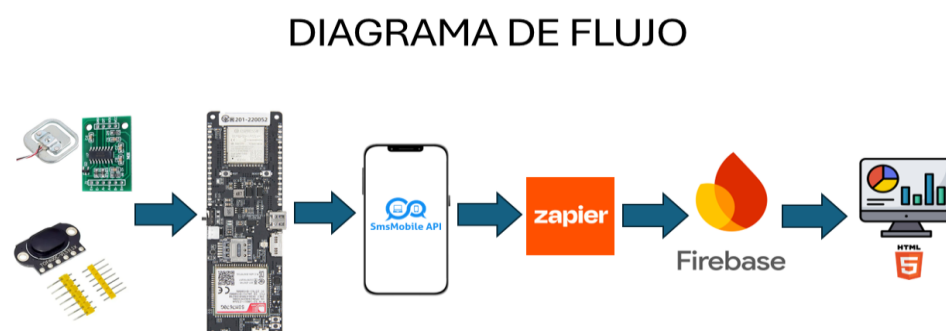


Una vez que las mediciones de peso y nivel son enviadas mediante SMS y procesadas por los servicios de automatización, los datos son almacenados en Firebase bajo una estructura organizada en colecciones y documentos.

Cada registro o documento que entra en la base de datos es una medición del sistema y trae la información del peso de dos contenedores, las distancias medidas por los tres sensores de nivel, la hora y la fecha de recibido del mensaje y el mensaje original completo. De esta manera se vuelve más fácil llevar un histórico del comportamiento de los contenedores.

Figura 11

Diagrama de flujo del procesamiento y visualización de los datos obtenidos.



3.6.2. Visualización de la información

Para la visualización final de los datos se creó una interfaz web básica con HTML, la cual obtiene la información directamente desde Firestore. Esta interfaz permite representar gráficamente el estado de los contenedores facilitando la interpretación de los niveles de llenado. Con los datos que se van recopilando en Firestore la interfaz puede ser modificada para ser más sofisticada y brindar otro tipo de información como por ejemplo una gráfica de cómo se va llenando el punto de acopio día a día, con qué rapidez. Con esto también se podría mostrar información combinada de varios puntos de acopio de un sector de la ciudad para que las empresas encargadas de la gestión de residuos puedan optimizar rutas de recolección para reducir costos de operación y emisiones al ambiente de los camiones de basura.

Figura 12

Visualización del estado de llenado y peso de los contenedores del prototipo.



3.7. Desarrollo del código del sistema

Para este proyecto el código del sistema debía coordinar la adquisición de los datos de nivel y peso de los sensores, ejecutar decisiones de control (bloqueo/desbloqueo lógico de compuertas), transmitir los datos por SMS y minimizar el consumo energético mediante ciclos de *deep sleep*. Para esto se buscaron librerías para los sensores VL53L1X y para el módulo HX711 y el desarrollo se fue dando por etapas que fueron poniendo a prueba cada una, éstas fueron:

- **Inicialización del hardware:** configuración de pines, bus I2C, pines XSHUT, LEDs indicadores y entrada del pulsador del operador.
- **Adquisición de datos:** lectura de distancia de tres VL53L1X (mm) y lectura de dos HX711 (peso), con tratamiento de valores inválidos o negativos.
- **Procesamiento y decisión:** cálculo del porcentaje de llenado a partir de la distancia (vacío/lleño) y evaluación de umbrales para generar eventos de control (cerrar/abrir).
- **Comunicación:** preparación del mensaje y envío por SMS a través del módem (AT commands).

- **Gestión de energía:** apagado del módem y entrada a *deep sleep* y posibilidad de despertar por botón.

3.7.1. Inicialización y direccionamiento de sensores VL53L1X

Debido a que los sensores VL53L1X tienen una misma dirección I²C por defecto, fue necesario implementar un mecanismo que permitiera asignar direcciones únicas a cada uno de ellos para evitar conflictos en el bus de comunicación. Para ello, se utilizó el pin XSHUT de cada sensor, el cual permite habilitar o deshabilitar individualmente el dispositivo. Al despertar la tarjeta, el sistema mantiene desactivados todos los sensores y luego los habilita de forma secuencial. Cada sensor se activa de manera individual, y se le asigna una dirección I²C distinta (0x2A, 0x2B y 0x2C). Este proceso evita interferencias entre la información en el bus I²C, permitiendo la lectura simultánea de los tres sensores de nivel.

Figura 13

Salida por consola de la inicialización y lectura de sensores VL53L1X.

```
Sensor 2 inicializado en 0x2B
Sensor 3 inicializado en 0x2C
Sensor 1: 144 mm   Sensor 2: 731 mm   Sensor 3: 170 mm
Sensor 1: 155 mm   Sensor 2: 732 mm   Sensor 3: 182 mm
```

3.7.2. Lectura del peso con HX711 y tratamiento de ruido

Para garantizar al sistema una lectura correcta al activarse el proceso de medición con el HX711 se ejecutó una rutina de lecturas, promedios y limpieza de mediciones.

El código realiza actualizaciones regulares del HX711 mediante **update()** y luego recoge el dato con **getData()**, entonces se implementó lo siguiente:

- **Lecturas múltiples por ciclo:** antes de capturar la lectura “final”, se ejecutan varias actualizaciones consecutivas para asegurar que el filtro interno del HX711_ADC tenga datos recientes.
- **Limpeza de medición:** si se detecta un peso negativo, se aproxima a cero para evitar reportes inconsistentes al sistema (por ejemplo, variaciones alrededor del punto de tara)

3.7.3. Cálculo del porcentaje de llenado

Para estimar el nivel de llenado se hace un cálculo tomando como referencia dos valores: distancia vacío y distancia llena con esto el código obtiene el nivel de llenado:

$$\frac{D_{Vacio} - D_{Leída}}{D_{Vacia} - D_{llena}} \times 100 = \%Llenado \quad (1)$$

En el código el valor obtenido se limita (clamp) entre [0,100] para evitar que mediciones fuera de rango generen porcentajes negativos o mayores a 100.

3.7.4. Lógica de control de compuertas

El código implementa una lógica de control de umbrales con histéresis de 5% para evitar activaciones repetitivas:

- Cierre cuando el contenedor está a $\geq 90\%$ de su capacidad.
- Apertura cuando el contenedor está a $\leq 85\%$ de su capacidad.

En el prototipo, en vez de actuadores se utilizan LEDs como equivalentes al pulso de control. El pulso representa el comando que en una implementación real se enviaría a un mecanismo de bloqueo.

Para evitar el problema de “repetir el pulso” después de cada despertar, el sistema guarda el estado de cada contenedor (bloqueado o no) y solo genera el pulso cuando existe un cambio real de estado (por ejemplo, de abierto a bloqueado).

3.7.5. Modo operador (despertar por botón)

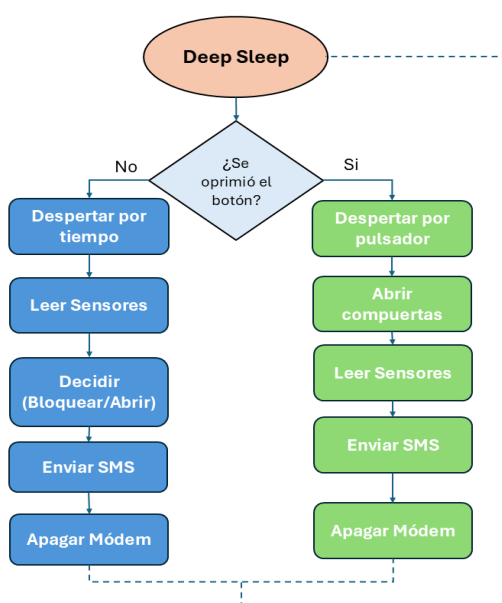
Se implementó un modo de operación manual para permitir que un operador desbloquee las compuertas cuando lo requiera y no tenga que meterse por completo en el punto PLUS como si fuera a recoger las basuras. Este modo se activa mediante un **pulsador** configurado como fuente de *wake-up* desde *deep sleep*.

Al detectar que el botón ha sido pulsado el código se despierta en un modo especial en el que:

- Envía un pulso de apertura a las tres compuertas una por una.
- Toma las medidas del estado actual de los contenedores.
- Envía los datos por SMS.
- Vuelve a entrar en *deep sleep*, sin ejecutar decisiones basadas en esas lecturas (Para evitar que se vuelvan a bloquear inmediatamente).

Figura 14

Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema.



3.7.6. Envío de datos por SMS y formato del mensaje

La transmisión de datos se hace mediante comandos AT enviados por UART al módem A7670E. El mensaje se construye en un formato que facilita el procesamiento posterior en Zapier como se explicó en la sección 4.5.4.(Simbase, 2024)

3.7.7. Gestión energética en *firmware*: *turnoff* módem y *deep sleep*

Para reducir el consumo se implementó el apagado del módem antes de entrar a *deep sleep* y el uso de `esp_deep_sleep_start()` con temporizador. Esto permitía configurar el tiempo de *deep sleep* deseado e incluso se hicieron pruebas programando *deep sleeps* cortos y largos:

- Sueño largo (ej. 10 horas o 12 horas).
- Sueños cortos (ej. 5 ciclos de 1min o 30 minutos)

Esto fue posible porque se pudo guardar el patrón mediante variables RTC y respaldo en EEPROM.

Figura 15

Sección de código de los parámetros configurables del modo *deep sleep*.

```
const uint32_t SUENO_LARGO_S = 3600; |  
const uint32_t SUENO_CORTO_S = 600;  
const uint8_t  NUM_CORTOS    = 5;
```

3.8. Prueba, validación y ajustes iterativos

Durante el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo diferentes pruebas sobre los distintos componentes del sistema, incluyendo los dispositivos de censado, el sistema de transmisión de datos y la lógica de control implementada. Estas pruebas se realizaron tanto en condiciones controladas como en escenarios que simulan el entorno real de operación del sistema, con el fin de evaluar su comportamiento y desempeño.

A partir de los resultados obtenidos en cada etapa de prueba, se identificaron diversas oportunidades de mejora que condujeron a la modificación, incorporación o eliminación de elementos tanto a nivel de hardware como de software. Este proceso iterativo permitió mejorar progresivamente el funcionamiento del sistema.

Como resultado de estas pruebas, análisis y ajustes, se obtuvo el prototipo final, el cual integra las soluciones técnicas adoptadas para cumplir con los requisitos funcionales y no funcionales definidos para el sistema.

3.8.1. Primeras pruebas

Las primeras pruebas tuvieron como objetivo verificar el correcto funcionamiento de los sensores. Para ello, se diseñaron y construyeron plataformas destinadas a la medición de peso, y se seleccionó un espacio adecuado que permitiera integrar los tres sensores de nivel VL53L1X junto con las tres plataformas de medición de peso, compuestas por celdas de carga de 50 kg y módulos de adquisición HX711.

Tabla 4

Resultados de pruebas de exactitud y dispersión del sensor VL53L1X.

Medida Real	Medida Tomada	%Error	Dispersión (mm)
1950mm	1966 – 1971mm	0.82% - 1.07%	±5
1900mm	1935 – 1942mm	1.84% - 2.16%	±7
1850mm	1866 – 1870mm	0.86% - 1.08%	±4
1800mm	1842 – 1847mm	2.33% - 2.61%	±5
1750mm	1810 – 1814mm	3.42% - 3.65%	±4
1700mm	1740 – 1755mm	2.35% - 3.23%	±15

1650mm	1700 – 1710mm	3.03% - 3.36%	±10
1600mm	1650 – 1656mm	3.12% - 3.50%	±6
1550mm	1601 – 1607mm	3.29% - 3.67%	±6
1500mm	1529 – 1537mm	1.93% - 2.46%	±8
1450mm	1469 – 1474mm	1.31% - 1.65%	±5
1350mm	1361 – 1370mm	0.81% - 1.48%	±9
1300mm	1316 – 1320mm	1.23% - 1.53%	±4
1250mm	1250 – 1254mm	0.00% - 0.32%	±4
1200mm	1199 – 1202mm	0.08% - 0.16%	±3
1150mm	1147 – 1151mm	0.08% - 0.26%	±4
1100mm	1114 – 1117mm	1.27% - 1.54%	±3
1000mm	1021 – 1023mm	2.10% - 2.30%	±2
950mm	958 – 963mm	0.84% - 1.36%	±5
900mm	906 – 910mm	0.66% - 1.11%	±4

Nota. Las medidas corresponden al rango de valores obtenidos a partir de múltiples lecturas consecutivas del sensor operando en modo continuo.

Tabla 5

Resultados de pruebas de exactitud y dispersión en la medición de peso.

Medida Real	Medida Tomada	%Error	Dispersión (g)
300g	304 – 307g	1.33% - 2.33%	±3
450g	434 – 435g	3.33% - 3.55%	±1
750g	768 – 771g	2.40% - 2.80%	±3
850g	838 – 840g	1.17% - 1.41%	±2

1500g	1505 – 1507g	0.33% - 0.46%	±2
2300g	2317 – 2329g	0.73% - 1.26%	±12
3500g	3475 – 3478g	0.62% - 0.71%	±3
4250g	4276 – 4280g	0.61% - 0.70%	±4
5100g	5100 – 5102g	0.00% - 0.04%	±2
6100g	6134 – 6137g	0.55% - 0.60%	±3
7350g	7316 – 7318g	0.43% - 0.46%	±2
7750g	7712 – 7798g	0.49% - 0.62%	±86
8750g	8808 – 8812g	0.66% - 0.70%	±4
9750g	9853 – 9855g	1.05% - 1.07%	±2
10700g	10751 – 10756g	0.47% - 0.52%	±5
11600g	11746 – 11750g	1.25% - 1.29%	±4
12150g	12228 – 12230g	0.64% - 0.65%	±2
12800g	12914 – 12916g	0.89% - 0.90%	±2
13600g	13594 – 13597g	0.04% - 0.02%	±3
14200g	14325 – 14327g	0.88% - 0.89%	±2

Nota. Las medidas corresponden al rango de valores obtenidos a partir de múltiples lecturas consecutivas del sensor operando en modo continuo.

Durante las primeras pruebas se implementó una plataforma de medición de peso utilizando cuatro celdas de carga de 50 kg distribuidas en las esquinas de la estructura. Esta configuración permite alcanzar una capacidad total aproximada de 200 kg, resultando adecuado para el prototipo. La correcta distribución mecánica de las celdas y su fijación mediante soportes impresos en 3D permitió obtener mediciones estables y consistentes.

En las pruebas con los sensores de nivel VL53L1X se observó que, debido a tolerancias propias del sensor y a variaciones en la instalación, cada unidad presentaba ligeras diferencias en la lectura. Para garantizar una estimación precisa del nivel de llenado, se definió una calibración individual por sensor, lo que permitió normalizar las mediciones y calcular el porcentaje de llenado de forma confiable.

Figura 16

Fragmento de código de las variables calibración de VL53L1X.

```
int pct1 = percentFromDistance(d1, D1_VACIO, D1_LLENO);  
int pct2 = percentFromDistance(d2, D2_VACIO, D2_LLENO);  
int pct3 = percentFromDistance(d3, D3_VACIO, D3_LLENO);
```

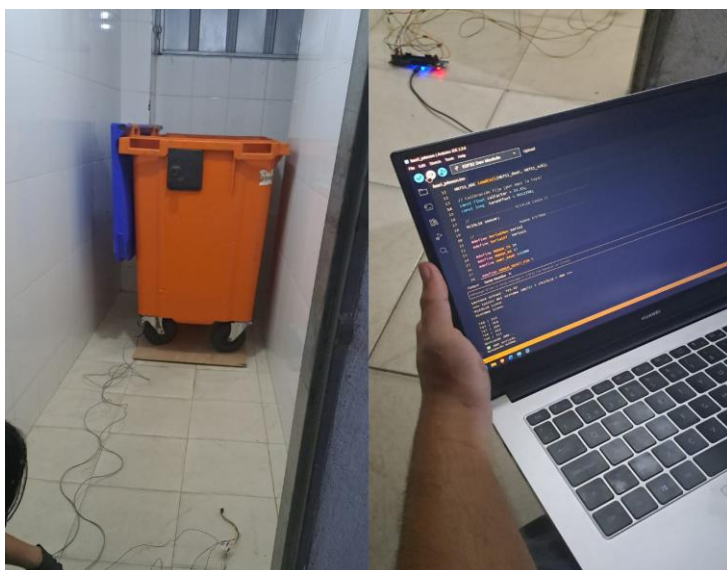
Una vez se empezó a utilizar el módem LTE de la tarjeta para enviar SMS, se pudo observar que al iniciar el sistema este tenía un tiempo de estabilización, ya que al principio se pretendía hacer una sola lectura de los sensores y enviarla automáticamente por SMS, sin embargo se podía apreciar que por muy bien que estuviera calibrado todo las lecturas que se enviaban en el SMS siempre eran erróneas, aquí entonces se decidió dejar un espacio de cinco lecturas antes de enviar el SMS lo cual funcionó ya que luego de esa cantidad ya los valores eran los correctos.

3.8.2. Pruebas en cuarto de aseo, cambio en la base de datos y visualización

Estas pruebas que se hicieron del sistema fueron con el objetivo de poner lo que se había diseñado hasta el momento en un entorno más cercano a lo que sería un punto de acopio PLUS, es decir un espacio cerrado de cemento o metal con unas dimensiones mayores. En este caso las pruebas se hicieron en el cuarto de aseo de un edificio de apartamentos. Para esta prueba se tuvo que hacer una plataforma de medición de peso más grande ya que debía ponerse encima un contenedor de basura de 770 litros que era con el que contaba el edificio.

Figura 17

Prueba del sistema en un cuarto de aseo.



Una vez calibrado el sistema, este se dejó operando de manera autónoma utilizando una batería Li-ion como fuente de alimentación, las calibraciones al principio se hicieron con poco peso por lo que los valores de calibración que arrojó el sistema no eran correctos. Luego de tres días se pudo ingresar para corregir y dejar listo el sistema, sin embargo, la batería Li-ion que se estaba utilizando en la tarjeta había estado funcionando de manera continua desde la primera instalación. La batería había sido cargada hasta los 4.17 V y cuando terminaron las pruebas (Aproximadamente 6 días) estaba en 3V. Hay que tener en cuenta de todos modos que el sistema se estaba despertando cada hora.

Una vez calibrado el sistema, se realizaron pruebas de operación utilizando alimentación por batería. Durante estas pruebas se evidenció la importancia de utilizar una antena LTE para garantizar la correcta transmisión de los mensajes SMS especialmente en entornos cerrados. Tras utilizar una antena LTE full-band, el sistema logró enviar los mensajes de manera consistente, validando el funcionamiento del módulo de comunicación en condiciones similares a una implementación real.

Esto es de gran importancia porque los puntos PLUS están pensados para lugares apartados y con su sistema dentro de un cuarto de aseo en un entorno de probablemente con poca cobertura. Para una implementación real la tarjeta va a necesitar una antena Full Band LTE para funcionar correctamente.

En estas pruebas las celdas de peso llegaron a su punto máximo ya que el solo tanque pesaba alrededor de 47 kilos por lo que solo podía llegar a medir como mucho ≈ 153 kilos si no llegaba antes al fallo mecánico, sin embargo, sus medidas iniciales fueron bastante precisas al igual que las del VL53L1X, lo que refleja sensor VL53L1X y módulo HX711 estaban funcionando correctamente.

En esta prueba, el cuarto de aseo tenía una altura de 2,37 metros, desde el piso hasta el techo, un contenedor de basura de 770 litros suele tener ≈ 137 cm de alto y ≈ 20 cm de diámetro en las ruedas (Reko | Grupo Zuma, s.f.). Aproximando valores el sensor estaba aproximadamente a un metro del tope del contenedor y ≈ 2.17 metros del fondo del contenedor. El sensor logró medir con precisión el valor máximo (Vacío).

Figura 18

Estado del contenedor durante la prueba de medición de nivel.



A partir de estas pruebas se adoptó el uso de Firebase como plataforma principal para el almacenamiento y gestión de los datos del sistema. En las etapas iniciales del proyecto, la información recolectada era enviada SMS a SMSmobileAPI, luego procesada a través de Zapier y finalmente almacenada y graficada en Google Sheets.

Si bien esta arquitectura permitió validar inicialmente la transmisión de datos, se identificó que Google Sheets no es una solución adecuada para el manejo de información generada por los puntos de acopio de residuos, ni ofrece la escalabilidad y flexibilidad para un sistema IoT. Por otro lado, Firebase brinda una infraestructura orientada al manejo de datos en tiempo real, con mayor capacidad de escalabilidad y mejor integración con aplicaciones web.

A demás, se desarrolló una interfaz gráfica en HTML que permite la visualización de la información almacenada en Firebase, la cual se actualiza automáticamente cada vez que se registra un nuevo dato en la base de datos, facilitando así el monitoreo constante del estado del sistema.

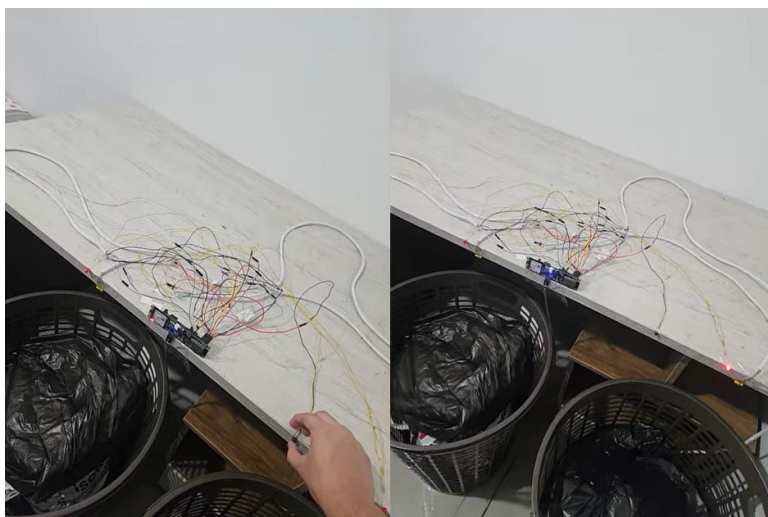
3.8.3. Últimas pruebas para la lógica de control de acceso

Por último, se le agregó al sistema un botón de acceso que sería para despertar del *deep sleep* a la tarjeta y permitirle a un operador revisar el estado actual de los contenedores abriendo todas las compuertas y no bloqueándolas por ese momento. También se le agregaron unos leds que se encargan de indicar cuando una puerta ha sido bloqueada o desbloqueada, es decir, simulando un actuador o el pulso que le enviaría la tarjeta al actuador en caso de que su canasta esté llena. Los puntos críticos del sistema se establecieron al 85% y al 90%, es decir cuando un contenedor estuviera al 90% de su capacidad o superior el sistema automáticamente cerraría la compuerta que da acceso a ese contenedor. Sin embargo, haciendo pruebas se evidenció que si la canasta está justo al 90% las medidas podían subir y bajar sobre ese número bloqueando y desbloqueando continuamente el acceso, por eso se aplicó histéresis, una vez bloqueado el

contenedor solo se va a poder desbloquear cuando su nivel esté por debajo del 85%. Se hicieron pruebas de todas estas actualizaciones y funcionaron correctamente.

Figura 19

Pruebas del sistema durante la validación de la lógica de control de acceso.



3.9. Costos del prototipo

Tabla 6

Tabla de costos finales de dispositivos del prototipo.

Cantidad	Componente	Valor Individual (COP)	Valor Total (COP)
1	LilyGoA7670	\$150.000	\$150.000
3	VL53L1X	\$14.000	\$42.000
2	HX711	\$5.000	\$10.000
8	Celda de peso	\$7.000	\$56.000
3	Diodo LED	\$300	\$900

1	Pulsador	\$500	\$500
3	Resistencias	\$300	\$900
	Total	\$177.100	\$260.300

Nota. Los costos corresponden a precios aproximados de mercado y pueden variar según proveedor, disponibilidad y volumen de compra.

4. Conclusiones

Con respecto a los objetivos planteados, se logró implementar un sistema capaz de medir periódicamente el nivel de llenado de los contenedores, controlar el acceso y transmitir la información hacia plataformas que permitieran el monitoreo. Estas funcionalidades permitieron validar que la solución propuesta respondía adecuadamente con la problemática de los puntos de acopio en Bucaramanga y a la solución propuesta de los puntos PLUS.

El uso de comunicación celular mediante SMS, aunque limitado en ancho de banda, resultó adecuado para la transmisión confiable de datos de monitoreo de bajo volumen, simplificando la arquitectura del sistema y garantizando compatibilidad con redes celulares ampliamente disponibles.

De los aspectos importantes aprendidos durante el desarrollo fue la importancia de las pruebas en condiciones parecidas a las de una implementación real. Estas pruebas permitieron detectar variables que en entornos controlados no eran tan fáciles de replicar, problemas de comunicación, capacidad física del sistema, lo cual es importante para la realización de un buen diseño.

La combinación de medición de nivel mediante sensores ToF y medición de peso mediante celdas de carga permitió obtener una estimación más robusta del estado de llenado

de los contenedores, compensando las limitaciones individuales de cada tecnología cuando se usan de forma aislada.

El uso de comunicación celular mediante SMS, aunque limitado en ancho de banda, resultó adecuado para la transmisión confiable de datos de monitoreo de bajo volumen, simplificando la arquitectura del sistema y garantizando compatibilidad con redes celulares ampliamente disponibles.

5. Recomendaciones

A partir del desarrollo del prototipo propuesto para los Puntos Limpios Urbanos Sostenibles (PLUS), se pudieron identificar varias oportunidades de mejora:

En proyectos futuros, se recomienda profundizar en el análisis de los datos recopilados por el sistema, así como incorporar análisis históricos y la generación de alertas automáticas que faciliten la toma de decisiones de la entidad encargada de la recolección de residuos. La aplicación de técnicas de análisis de datos podría permitir la determinación de patrones de llenado y la optimización de las rutas y frecuencias de recolección.

Si bien la estrategia de SMS, SMSMobileAPI, Zapier resultó adecuada para la validación funcional del prototipo, lo ideal es disminuir al mínimo las dependencias externas. Se recomienda que para futuros desarrollos se explore la posibilidad de establecer conexiones directas con la base de datos mediante protocolos estándar HTTP o HTTPS.

Para una implementación a escala real, se recomienda el uso de celdas de carga de mayor capacidad nominal y estructuras mecánicas reforzadas, con el fin de evitar saturación del sensor y fallos mecánicos ante cargas elevadas.

Referencias

- Andrade, R. O., & Yoo, S. G. (2019). *A comprehensive study of the use of LoRa in the development of smart cities*. **Applied Sciences**, 9(22), 4753. <https://doi.org/10.3390/app9224753>
- Anexos - Google Drive*. (s. f.-b). Google Drive. https://drive.google.com/drive/folders/1vbBS_h0C3wSIo10OORgJhSQSjN2auRho
- Baena-Navarro, R., Carriazo-Regino, Y., & Macea-Anaya, M. (2025). Aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) y la computación en la nube en el monitoreo ambiental: Revisión sistemática y análisis de datos. *Dosimetría ambiental mediante IoT* (pp. 15–84).
- Barrio Andrés, Moisés (2022). *Internet de las cosas* (3ª edc.) Editorial Reus. https://books.google.com.co/books?id=zWQfEQAAQBAJ&dq=internet+de+las+cosa&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Botella Puig, A. (2023). *Sistema experto para la recogida inteligente de basuras* (Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación). Universidad Miguel Hernández de Elche, Escuela Politécnica Superior de Elche.
- Comandos AT: Configuración del router y pruebas de conectividad*. (2024, abril 3). Simbase.com; Simbase. <https://simbase.com/es/blog/at-commands-router-setup-and-connectivity-tests>
- Contenedor con 4 ruedas Plastik Gogic 770 L*. (s/f). Reko | Grupo Zuma. Recuperado el 11 de febrero de 2026, de <https://botesdebasura.com.mx/producto/contenedor-con-4-ruedas-plastik-gogic-770-l/>

Convert your mobile phone into an SMS gateway. (2023, junio 19). SMSMobileAPI - Convert Your Mobile Phone into an SMS Gateway; SMSMobileAPI. <https://smsmobileapi.com/>

Hais, Y. R., Hamganisyah, F. I., Saputra, E., & Pathoni, H. (2025). Design of a flood detection system using VL53L1X sensor based on SMS gateway. *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 9(2).

Hercog, D., Lerher, T., Truntić, M., & Težak, O. (2023). *Design and implementation of ESP32-based IoT devices*. *Sensors*, 23(15), 6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>

LilyGO. (2023). *T-A7670E LTE Cat-1 Development Board Documentation*. GitHub repository. <https://github.com/Xinyuan-LilyGO>

Mercado Libre. (s. f.). <https://www.mercadolibre.com.co/sensor-distancia-laser-timeofflight-tiempo-vuelo-vl53l1x/up/MCOU2634610807>

Mercado Libre. (s/f). Com.co. Recuperado el 11 de febrero de 2026, de <https://www.mercadolibre.com.co/canasto-cesto-ropa-sucia-plastico-con-tapa-grande-color-blanco-canasto-redondo/p/MCO32032448>

Mollenedo, M., & Alonso, R. (2020, junio). *Sistema de monitorización del estado de un contenedor de reciclaje*. Universitat Oberta de Catalunya (UOC). <https://openaccess.uoc.edu/items/765a3d9d-f9ce-48ba-8201-3e47f3723e7e>

Paredes, A. E., Valenzuela, A. J. (2021). Diseño de una balanza automática en la industria logística ecuatoriana para el pesado de encomiendas utilizando celdas de carga. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

Pasolini, G., Buratti, C., Feltrin, L., Zabini, F., De Castro, C., Verdone, R., & Andrisano, O. (2018). *Smart city pilot projects using LoRa and IEEE 802.15.4 technologies*. *Sensors*, **18**(4), 1118. <https://doi.org/10.3390/s18041118>

Sánchez, D. (2019). *Tecnologías celulares narrow-band: Análisis práctico de las soluciones de Telefónica y Vodafone*. Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid.

Sindicato de los Servicios Públicos de la Empresa de Aseo de Bucaramanga SINTRASERVIPUBLICOS. (2024). *Proyecto puntos limpios urbanos sostenibles PLUS* (Documento institucional no publicado). Bucaramanga, Colombia.

STMicroelectronics. (2022). *VL53L1X: A new generation, long distance ranging Time-of-Flight sensor based on ST's FlightSense technology* (Datasheet, DocID031281 Rev. 6). STMicroelectronics. <https://www.st.com>

STMicroelectronics. (2024). *VL53L0X time-of-flight ranging sensor: Datasheet* (DS11555 Rev. 6). <https://www.st.com>

Sung, W.-T., Isa, I. G. T., & Hsiao, S.-J. (2023). *An IoT-based aquaculture monitoring system using Firebase*. *Computers, Materials & Continua*.

Universidad Internacional de La Rioja, (2023). *La arquitectura IoT y sus usos en distintos sectores*. Universidad Internacional de La Rioja. <https://www.unir.net/revista/ingenieria/arquitectura-iot/>

Apéndice

Apéndice A. Carpeta drive del proyecto en Google Drive

En el siguiente enlace público de Google Drive se podrán encontrar los códigos de prueba, diagrama de conexiones, videos de pruebas, recomendaciones y todo lo relacionado con el desarrollo y productos finales del proyecto.

[AnexosProyectoPuntosDeAcopio - Google Drive](#)