



Implementación y Evaluación del Sistema de Medición de Peso y Volumen de un Contenedor de Residuos de Construcción usando Nodos Transductores y el Sistema de Comunicación entre estos con El Nodo Pasarela y La Interfaz con el Usuario

Autor:

Sergio Andrés Marín Patiño

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Ingeniería Electrónica

Bogotá D.C, Colombia

2024



Implementación y Evaluación del Sistema de Medición de Peso y Volumen de un Contenedor de Residuos de Construcción usando Nodos Transductores y el Sistema de Comunicación entre estos con El Nodo Pasarela y La Interfaz con el Usuario

Autor:

Sergio Andrés Marín Patiño

Director:

Enrique Estupiñán Escalante

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Ingeniería Electrónica

Bogotá D.C, Colombia

2024

Tabla de contenido

Introducción.....	5
Objetivos.....	6
Estado del arte	7
Desglose Esencial: Componentes y Operación del Internet de las Cosas (IoT).....	7
IoT industrial	8
IoT en la construcción	9
Beneficios del IoT en la construcción.....	10
Desafíos y Soluciones en la Alimentación de Dispositivos IoT	10
La Importancia de una Elección Acertada en Baterías para Proyectos de IoT.....	11
Requisitos típicos de energía en dispositivos IoT	11
Tipos de baterías en dispositivos IoT.....	12
Metodología	17
Peso y Cargas Medibles.....	17
Opciones de Volumen para las Cargas.....	17
Protocolo Inalámbrico para el Envío de Datos	17
Tasa de Muestreo para la Toma y Envío de Datos.....	18
Suministro de Energía.....	18
Especificaciones del Sistema Sensor	18
Comportamiento teórico	19
Amplificación de los datos	19
Acondicionamiento de señal	23
Fuente de alimentación.....	25
Volumen Ocupado por El Sistema.....	26
Resultados	27
Comportamiento experimental.....	27
Amplificación de los datos	29
Amplificación por 1000	29
Amplificación por 400	31
Acondicionamiento de señal	33
Simulación del diseño.....	34
Diseño de PCB.....	36
Materiales utilizados	38

Montaje final y consideraciones	39
Conclusiones	41
Planes a futuro y líneas de trabajo	43
Anexos	45
Anexo 1: materiales utilizados	45
Tabla de precios.....	48
Anexo 2: Pruebas de funcionamiento en la presentación final	49
Anexo 3: Análisis del Comportamiento del Voltaje de las Baterías en Pleno Funcionamiento	50
Anexo 4: Análisis del Comportamiento del Sistema ante Entornos con Vibraciones	51
Anexo 5: Justificación del Uso de Voltajes de $\pm 12V$ en un Sistema Alimentado por Baterías .	53
Anexo 6: Códigos Empleados en la Programación de las Tarjetas	53
Anexo 7: Diseño de PCB's de cada Módulo	54
Referencias	55

Introducción

En un mundo cada vez más consciente de la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente, la gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición (RCD) se ha convertido en una prioridad. La construcción y demolición generan grandes cantidades de desechos, que a menudo terminan en vertederos o, peor aún, se descartan de manera inadecuada, afectando negativamente el entorno y los recursos naturales.

La importancia de la Separación de Residuos de Construcción radica en varios aspectos clave. Primero, al separar los residuos en categorías específicas (como madera, metal, hormigón, entre otros), se puede evitar que una gran cantidad de materiales útiles termine en vertederos, lo que reduce la carga sobre ellos y prolonga su vida útil. Además, la separación precisa permite identificar materiales reciclables y reutilizables, lo que conduce a un reciclaje más eficiente y a la reducción de la necesidad de extraer recursos naturales, disminuyendo así la huella de carbono. (Vertedero.es. s.f)

Además, el cumplimiento normativo es fundamental, ya que muchas municipalidades exigen la separación y el manejo adecuado de los residuos de construcción. Un sistema eficiente puede ayudar a las empresas y municipios a cumplir con estas regulaciones y evitar sanciones, lo que a su vez puede traer beneficios económicos al reducir los costos de eliminación y mejorar la rentabilidad de la cadena en general.

El sistema que se diseñó y que se está construyendo, basado en sensores de celdas de carga y proximidad, tiene el potencial para revolucionar la forma en que se manejan los residuos de construcción. Al recopilar datos precisos sobre la profundidad, como estimación del volumen, y la masa de los materiales, permitirá obtener información más precisa, de forma automática para que la recolección, el seguimiento remoto y la mejora de la eficiencia en el manejo de los residuos. En resumen, este sistema no solo contribuirá a la sostenibilidad ambiental, sino que también ofrecerá beneficios económicos y operativos significativos. Representa una herramienta valiosa para un futuro más limpio y responsable.

De acuerdo con la Cámara Colombiana de la Construcción (Camacol), de los 18 millones de toneladas de residuos de construcción generados cada año en el país, Bogotá genera cerca de 12 millones, seguida de Medellín con 860,000 y Manizales con 306,000. Colombia en su totalidad genera aproximadamente 22 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición, lo que representa entre el 35% y el 40% de todos los desechos producidos en el país. Estos residuos constituyen en promedio el 40% de los residuos sólidos en Colombia. Por lo tanto, el proyecto tiene un papel crucial en abordar este desafío y contribuir a una gestión más eficiente y sostenible de los residuos de construcción en el país.

Objetivos

- Se plantea la implementación efectiva de un sistema integral de medición de peso, con dimensiones aproximadas de un contenedor pequeño, y volumen de residuos depositados en un contenedor de construcción y demolición. Este sistema se enmarca en la denominada Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés), y utilizará una red de sensores inalámbricos con nodos transductores, junto con un sistema de comunicación eficiente entre estos nodos con el nodo pasarela. De manera que se mejore la recolección y precisión de información relevante, lo que contribuirá significativamente a la mejora de la gestión eficiente de los residuos y a la toma de decisiones informadas en el proceso de manejo de residuos.
- Integración de Transductores de Alta Precisión: Se busca integrar transductores altamente precisos que permitan la medición confiable del peso y la profundidad de diferentes sensores, posibilitando la estimación simultánea del volumen del residuo. Esta integración en un sistema coherente facilitará la obtención de datos precisos y simultáneos sobre el peso, la profundidad de los sensores y el volumen del residuo, mejorando así la eficacia y confiabilidad del proceso de medición.
- Desarrollo y Validación de Circuitos para la Integración de Sensores: Se plantea la elaboración de esquemáticos eléctricos detallados que abarquen tanto los transductores como los circuitos de acondicionamiento de señales necesarios para el funcionamiento óptimo de los sensores. Además, se trabajará en la integración eficiente de los circuitos impresos en los nodos transductores, garantizando una conexión eléctrica adecuada y una disposición espacial eficiente para optimizar el rendimiento del sistema de medición.
- Validación y Optimización del Sistema Implementado: Se llevarán a cabo pruebas exhaustivas para verificar la precisión y confiabilidad del sistema, con el objetivo de identificar y corregir posibles inconvenientes. Asimismo, se fusionará la información proveniente de diversos sensores de distancia y profundidad para realizar una estimación precisa del volumen del residuo, lo que contribuirá a mejorar la eficiencia y precisión del sistema de medición en su conjunto.

Estado del arte

Para comprender mejor el sistema en desarrollo, es crucial entender de que se trata un dispositivo de IoT (Internet de las cosas) y comprender por qué se clasifica como tal. Además, es importante examinar algunos ejemplos actuales que cumplen funciones similares al sistema en desarrollo, así como aquellos que realizan tareas diferentes, pero dentro del mismo ámbito de la construcción.

Una vez se haya adquirido un entendimiento más profundo del concepto de dispositivo IoT, así como de sus usos y beneficios dentro del ámbito de la construcción, es necesario ahondar en el modo óptimo de alimentación de los sistemas IoT y en las razones que lo respaldan.

Desglose Esencial: Componentes y Operación del Internet de las Cosas (IoT)

El concepto de IoT, o Internet de las cosas, engloba la red interconectada de dispositivos y la tecnología que facilita tanto la comunicación entre estos dispositivos y la nube, como entre ellos mismos. El Internet de las cosas fusiona objetos cotidianos con la red, permitiendo que dispositivos comunes, como cepillos de dientes, aspiradoras, automóviles y máquinas, utilicen sensores para recopilar datos y responder de manera inteligente a las necesidades de los usuarios. Esta convergencia ha dado lugar a todo un sector dedicado a incorporar dispositivos IoT en hogares, empresas y oficinas, que pueden transmitir automáticamente datos hacia y desde Internet. (Portal de las tecnologías de Cámara Valencia, s.f)

Un dispositivo IoT se define como un objeto con conexión a Internet y capacidad de procesamiento, que permite la recopilación de datos físicos y la ejecución de acciones remotas. Esta tecnología crea un entorno favorable para la oferta de servicios personalizados, mejorando la experiencia del usuario y optimizando la eficiencia operativa. La adopción del IoT en la industria persigue una conectividad total, facilitando la interacción entre todos los actores de la cadena de suministro. Estos dispositivos pueden capturar y analizar datos en tiempo real o enviarlos a la Nube para almacenarlos y analizarlos mediante técnicas de Big Data e Inteligencia Artificial. (Portal de las tecnologías de Cámara Valencia, s.f)

De acuerdo con Amazon Web Services, un sistema típico de IoT opera mediante la recolección y el intercambio de datos en tiempo real, y consta de tres elementos principales:

- Dispositivos inteligentes: Estos dispositivos están equipados con capacidades de procesamiento y recopilan datos del entorno, interacciones de los usuarios o patrones de uso. Luego, transmiten estos datos a través de Internet hacia y desde su aplicación IoT correspondiente.
- Aplicación de IoT: Esta aplicación es un conjunto de servicios y software que integra los datos recibidos de múltiples dispositivos IoT. Utilizando tecnologías como el aprendizaje automático o la inteligencia artificial, analiza estos datos para tomar

decisiones fundamentadas. Estas decisiones se transmiten de vuelta a los dispositivos IoT, que responden de manera inteligente a las entradas recibidas.

- Interfaz de usuario gráfica: Los dispositivos IoT, o incluso flotas de ellos, pueden gestionarse mediante una interfaz de usuario gráfica. Ejemplos comunes incluyen aplicaciones móviles o sitios web que permiten registrar y controlar los dispositivos inteligentes de manera intuitiva.

Con una comprensión clara del concepto y los componentes esenciales de los sistemas IoT, es crucial afinar las ideas para enfocar directamente el sistema propuesto en el campo del manejo de residuos de construcción. Por tanto, se procederá a explorar el concepto de IoT industrial, indagando cómo esta tecnología puede revolucionar la gestión de residuos y optimizar los procesos en la industria de la construcción.

IoT industrial

El Internet de las Cosas Industrial (IIoT) se refiere a los dispositivos inteligentes empleados en sectores como la manufactura, el comercio minorista, la atención médica y otras empresas con el propósito de impulsar la eficiencia empresarial. Estos dispositivos industriales, que abarcan desde sensores hasta equipos especializados, proveen a los empresarios datos detallados y en tiempo real que pueden ser aprovechados para optimizar los procesos empresariales. Tal información abarca la gestión de la cadena de suministro, la logística, los recursos humanos y la producción, contribuyendo a la reducción de costos y al aumento de los flujos de ingresos. (Amazon Web Services, s.f.)

A continuación, se examinarán los sistemas industriales inteligentes presentes en algunas verticales.

- Fabricación: El IoT empresarial en la fabricación emplea el mantenimiento predictivo para reducir el tiempo de inactividad no planificado, así como tecnologías de dispositivos integrados en la vestimenta para mejorar la seguridad de los trabajadores.
- Automóviles: Los análisis y la robótica controlados por sensores incrementan la eficiencia en la manufactura y el mantenimiento automotriz. Los diagnósticos y la resolución de problemas pueden realizarse con mayor celeridad, mientras que el sistema de IoT solicita automáticamente repuestos.
- Logística y transporte: Los dispositivos de IoT comerciales e industriales son valiosos para gestionar la cadena de suministro, incluyendo la gestión de inventarios, relaciones con proveedores, administración de flotas y mantenimiento programado.

IoT en la construcción

La construcción se presenta como una actividad en constante evolución que no solo genera empleo, sino que también actúa como pilar fundamental para la industrialización. En este contexto, la aplicación de IoT implica la adopción de dispositivos integrados y automatizados, así como el uso de programas informáticos avanzados, con el propósito de mejorar la eficiencia de las operaciones de construcción. (MOKOSmart, 2024)

Dentro del ámbito de la construcción, se utilizan diversas tecnologías de IoT, entre las que se incluyen:

- LoRa: La implementación de soluciones de conectividad inalámbrica LoRa RF también juega un papel crucial en la integración de IoT en edificios inteligentes. Las señales LoRa tienen una impresionante capacidad para penetrar materiales de construcción densos, lo que facilita la transmisión de señales para rastrear activos y enviar información incluso en sótanos y áreas subterráneas, a distancias de hasta 10 km. (MOKOSmart, 2024)
- Tecnología BLE (Bluetooth Low Energy): Esta tecnología se emplea para el seguimiento de equipos de construcción, tanto en entornos interiores como exteriores. La ventaja de BLE radica en su bajo consumo de energía, lo que permite una duración prolongada de la batería en los dispositivos conectados. (MOKOSmart, 2024)
- Tecnología BIM integrada con IoT: La integración de Building Information Modeling (BIM) con dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) representa un avance significativo en la industria de la construcción. BIM, un proceso digital que utiliza modelos tridimensionales inteligentes ha demostrado su eficacia para mejorar la eficiencia y reducir costos en todas las etapas de un proyecto de construcción. Al integrar IoT con BIM, se conectan datos en tiempo real de los dispositivos IoT a los modelos BIM, lo que proporciona una visión integral del proyecto y facilita la toma de decisiones informadas.

Los métodos de integración incluyen el uso de API de herramientas BIM, transformación de datos de BIM en bases de datos relacionales, y el uso de tecnologías web semánticas, entre otros. Sin embargo, existen limitaciones, como la falta de control de actuadores a través de BIM y la necesidad de actualizaciones manuales de información estática.

Para superar estas limitaciones y avanzar en la integración de BIM e IoT, se sugiere centrarse en patrones de arquitectura orientada a servicios y estrategias basadas en servicios web. Además, es necesario establecer estándares de gestión e integración de información, resolver problemas de interoperabilidad y explorar el uso de la computación en la nube.

El futuro de esta integración es prometedor, con un enfoque en la adopción de patrones de arquitectura orientada a servicios y estrategias basadas en servicios web. Se espera que se establezcan estándares de gestión e integración de información, se resuelvan problemas de interoperabilidad y se explore el uso de la computación en la nube para potenciar aún más la eficacia de esta integración. (Tang et al., 2019)

Beneficios del IoT en la construcción

El uso de elementos IoT dentro del ámbito de la construcción trae consigo notables beneficios, dentro de los cuales se destacan los siguientes: (MOKOSmart, 2024)

- **Ahorro de costos:** Los dispositivos IoT asisten a los administradores de la construcción en el seguimiento de los gastos diarios y en el rastreo de la eficacia de los activos mediante el control del uso de material de construcción. Facilitando la distribución conveniente y rápida de los recursos.
- **Mejora de la productividad:** El uso de IoT en la Construcción facilita la coordinación adecuada de trabajadores y equipos, asegurando que todos los participantes estén en el lugar correcto en el momento adecuado. Todas las operaciones se basan en datos reales en lugar de suposiciones. Se reduce la posibilidad de errores y aumenta la productividad.
- **Mejora de la seguridad y protección:** Los dispositivos portátiles y otros dispositivos IoT monitorean las condiciones de salud de los empleados y el entorno laboral. Esto contribuye a mantenerlos seguros al identificar situaciones de riesgo y proporcionar advertencias rápidas sobre sustancias peligrosas en el ambiente.
- **Mantenimiento predictivo:** El mantenimiento predictivo tiene como objetivo verificar el estado de la maquinaria pesada. Mediante la instalación de sensores para monitorear el uso de energía o la temperatura del equipo, los contratistas pueden detectar problemas operativos antes de que ocurran y realizar reparaciones preventivas para evitar interrupciones en el proyecto.
- **Facilitación de la gestión de proyectos:** El uso de IoT en la construcción ayuda a informar a los empleados, permitiendo que el personal acceda a la información de manera independiente, sin necesidad de consultar al supervisor. Esto promueve un entorno de trabajo coordinado y sin interrupciones para todos los empleados.

Desafíos y Soluciones en la Alimentación de Dispositivos IoT

Los dispositivos integrados conectados a través de IoT deben operar con su propia energía, sin depender de la intervención humana para gestionar la energía restante, cambiar baterías o conectarse a una fuente de alimentación externa. En muchos casos, se espera que los dispositivos IoT funcionen durante años, lo que requiere soluciones innovadoras para garantizar un suministro continuo de energía. (Digi-Key, 2013)

A pesar de la diversidad de los dispositivos diseñados para IoT y el IIoT (Internet Industrial de las Cosas), todos requieren una fuente principal de energía para la entrada, el procesamiento y la comunicación de datos. Sin embargo, la naturaleza diversa de las funciones y entornos de estos dispositivos ha dado lugar a una variedad de fuentes de energía, desde líneas eléctricas hasta baterías y celdas solares. (Digi-Key, 2019)

Además, la amplia gama de funciones y modos de funcionamiento de estos dispositivos requiere una selección cuidadosa de fuentes de alimentación internas para maximizar la eficiencia y mantener el tamaño físico pequeño, sin comprometer el rendimiento ni requerir una gestión térmica extensa. La elección de la fuente de energía dependerá en cierta medida de los requisitos específicos de la aplicación. Por lo tanto, se necesitan dispositivos de energía versátiles para garantizar que los diseños puedan adaptarse a la amplia gama de escenarios operativos. (Interempresas, 2016)

La Importancia de una Elección Acertada en Baterías para Proyectos de IoT

Muchos proyectos de IoT dependen de la energía de la batería para garantizar la transferencia de datos y la comunicación, independientemente de la disponibilidad de energía en la red principal y las condiciones ambientales. Sea en la medición, monitorización o seguimiento, la elección de la batería tiene un impacto significativo en el éxito a largo plazo del proyecto, tanto desde una perspectiva financiera como técnica.

Desde un punto de vista técnico, la batería seleccionada debe cumplir con las demandas específicas de la aplicación de IoT y la red de comunicaciones a lo largo de toda la vida útil del proyecto. Es esencial que las baterías que cumplen con los requisitos necesarios estén disponibles comercialmente para su adquisición. Asimismo, para la mayoría de los proyectos de IoT, es fundamental seleccionar una batería que ofrezca una vida útil prolongada y confiable, con mínimas necesidades de mantenimiento. (Digi-Key, 2013)

Requisitos típicos de energía en dispositivos IoT

Un dispositivo sensor típico consume solo unos pocos microamperios (μA) de corriente en el modo de reposo, cuando espera una indicación externa para realizar una lectura. En modo de espera, puede necesitar alrededor de $80 \mu\text{A}$ para que funcione un reloj interno entre lecturas temporizadas. El registro y procesamiento de datos pueden usar 20 mA . La transmisión de unos pocos bytes de datos puede requerir hasta 50 mA o más, dependiendo del protocolo utilizado, la topografía de la red y la ubicación del dispositivo.

La estrategia básica para optimizar la vida útil de la batería es mantener el dispositivo en modo de reposo el mayor tiempo posible y activarlo solo para fases de actividad muy cortas. Un factor importante es la corriente en modo de reposo, que impacta directamente el consumo de energía durante esta fase. Tan crucial como esto es el consumo de energía en las fases de actividad del dispositivo.

La siguiente figura muestra un perfil típico de consumo de corriente de los dispositivos IoT modernos. El modo de reposo generalmente dura varios segundos con corrientes en el rango de μA . La fase activa generalmente consiste en varios intervalos con diferentes niveles de consumo de corriente que pueden alcanzar hasta unos 100 mA . (Rohde & Schwarz, 2024)

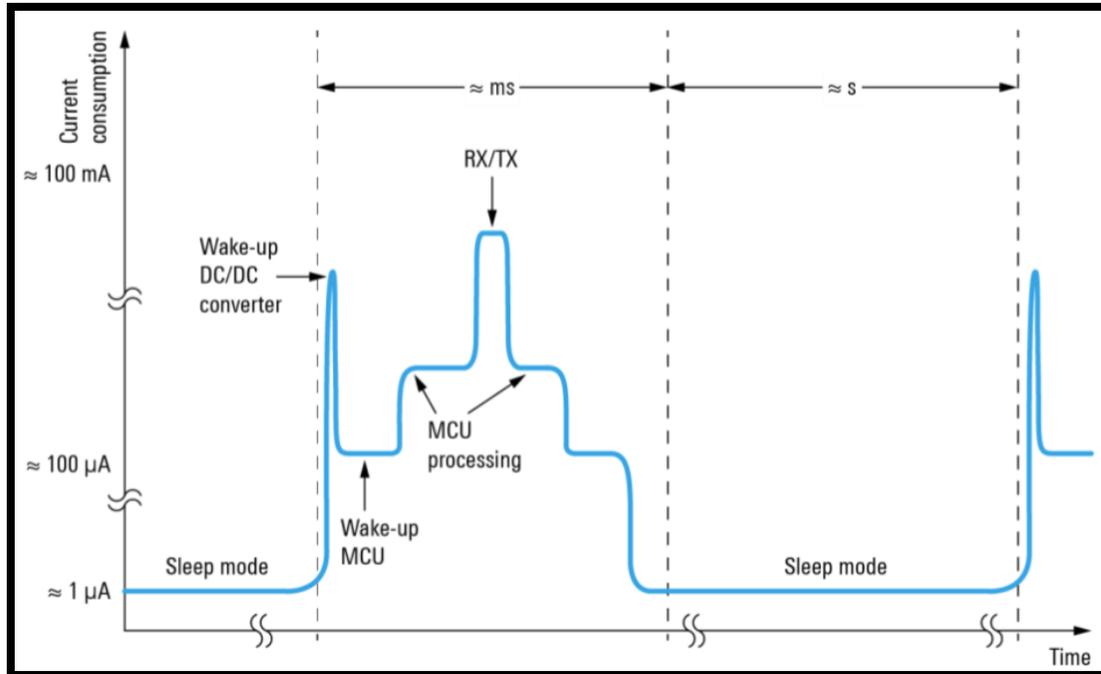


Ilustración 1: Comportamiento consumo de corriente de un microcontrolador en modo Deep Sleep. Tomado de: https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/optimizaci-n-de-la-vida-til-de-la-bater-a-en-dispositivos-iot-gracias-a-una-sonda-de-potencia-multicanal-nota-de-aplicacion_56280-497822.html.

Tipos de baterías en dispositivos IoT

El fenómeno del Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la recopilación de datos a nivel mundial, permitiendo la comunicación incluso entre objetos no electrónicos. Sin embargo, la selección de baterías para proyectos IoT puede ser desafiante debido a la amplia variedad de modelos disponibles.

Para el sistema que se está planeando, los sensores que se piensan utilizar van a estar expuestos en la periferia del propio sistema IoT pero el procesamiento de los datos provenientes de estos no se hará de manera continua si no en distintos momentos, haciendo que el sistema dure en modo letargo por más tiempo. En aplicaciones donde los nodos sensores permanecen mayormente en modo de reposo, activándose solo para mediciones o conexiones inalámbricas de baja potencia, las pilas de botón son una opción común. Estas pilas, con químicos alcalinos, ofrecen una tensión de celda de 1.5V, que disminuye a 0.9V al descargarse. Para aplicaciones que requieren tensiones más altas, las baterías planas de ion-litio son una alternativa ampliamente utilizada, proporcionando 3V cuando están completamente cargadas y bajando a 2.2V al descargarse. (Interempresas, 2016)

Dentro de las baterías de ion-litio, existen variantes como el tipo BR, que aumenta la capacidad, y el tipo CR, que minimiza la impedancia interna para suministrar corrientes de mayor pulso. Por ejemplo, las baterías BR de Panasonic pueden ofrecer capacidades de hasta

500 mAh (BR3032), mientras que las baterías CR proporcionan una capacidad de corriente pulsada más alta.

Teniendo en cuenta los tipos de baterías que pueden ser óptimos, se expondrán algunas de ellas que pueden ser útiles para la aplicación que se está desarrollando.

- Baterías alcalinas

Las pilas alcalinas, también conocidas como baterías alcalinas o pilas tipo Mallory, funcionan a través de una reacción química entre el zinc (Zn) como ánodo y el dióxido de manganeso (MnO₂) como cátodo, con hidróxido de potasio (KOH) como electrolito. En comparación con las pilas salinas, como las de zinc-carbono o las de cloruro de zinc, las alcalinas ofrecen una mayor densidad de energía y una vida útil más prolongada, proporcionando entre tres y cinco veces más tiempo de funcionamiento que las pilas salinas de tamaño similar. Sin embargo, su capacidad está fuertemente influenciada por la carga o potencia consumida por el dispositivo al que se conectan.

Por ejemplo, una pila alcalina AA puede tener una capacidad real de 3000 mAh a baja potencia, pero esta capacidad puede reducirse a 700 mAh con una carga de 1000 mW, como suele ser el caso en cámaras digitales. A diferencia de las pilas salinas, las alcalinas ofrecen una capacidad casi igual tanto para usos intermitentes como continuos con cargas ligeras. La tensión nominal de una pila alcalina es de 1,5 V y puede llegar a veces hasta los 1,65 V, mientras que la cantidad de corriente que puede producir es aproximadamente proporcional a su tamaño físico, con una batería AA capaz de entregar hasta 700 mA sin calentarse significativamente. (Wikipedia, 2024)

En la siguiente imagen se puede apreciar las Curvas de descarga de una pila alcalina de manganeso (línea azul), en comparación con una pila de zinc-carbono (marrón), y una pila de níquel e hidruro metálico (verde). En el eje vertical se representa el voltaje, y en el eje horizontal el tiempo de funcionamiento.

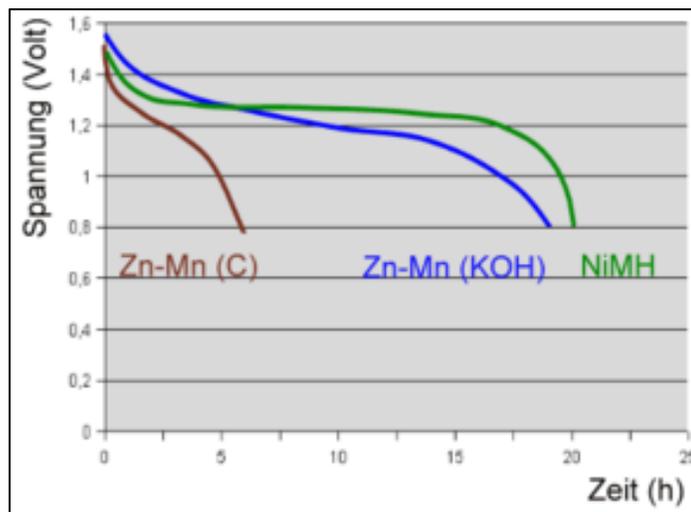


Ilustración 2: Curva de descarga de una batería Alcalina. Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_alcalina.

- Baterías de Litio

La batería de iones de litio (Li-Ion) almacena energía eléctrica mediante una reacción electroquímica reversible entre el ánodo y el cátodo, utilizando una sal de litio como electrolito. Compuesta por ánodo, cátodo, separador y electrolito, cada componente es esencial para su funcionamiento. Estas baterías son ligeras, tienen alta capacidad energética, resistencia a la descarga y una larga vida útil, lo que las hace ideales para dispositivos electrónicos de consumo masivo como ordenadores portátiles y teléfonos móviles.

Destacan por su alta densidad de energía, lo que permite almacenar más carga en menos espacio, y su capacidad de descarga rápida, especialmente en variantes como las de Litio-ion Polímero (Lipo). Ofrecen una tensión constante de 3,7 voltios por célula, mínimo efecto memoria y una descarga lineal que facilita conocer su estado de carga. Además, las baterías Li-Ion soportan más de 3000 ciclos de carga/descarga con mínima pérdida de capacidad y tienen una baja tasa de autodescarga. (Iberdrola, 2024)

Estas ventajas hacen que las baterías de iones de litio sean la opción preferida para muchas aplicaciones electrónicas. La curva de descarga típica para una batería de litio, Ilustración 3, con un voltaje nominal de 3,7V, que puede llegar hasta un máximo de 4,2V a distintas temperaturas, ilustra la estabilidad y eficiencia de estas baterías en diversas condiciones.

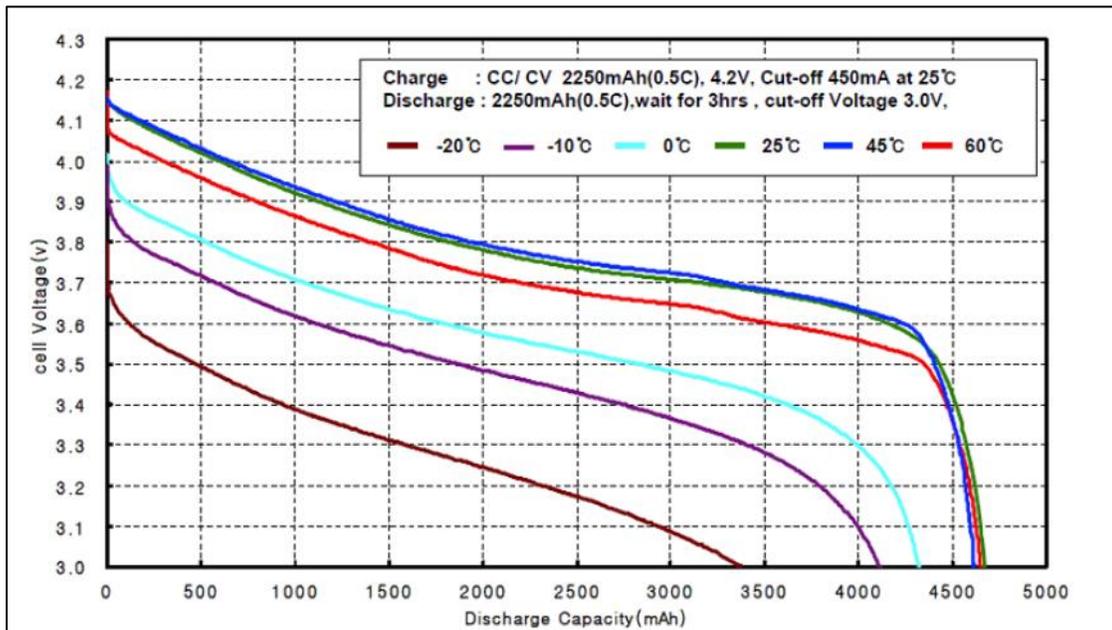


Ilustración 3: Curva de descarga de una batería de Litio. Tomado de: <https://fullandfast.com/blog/baterias-c-de-capacidad-real-y-curva-de-descarga-y-no-de-cuento/>

- Baterías de Sodio

Las baterías de iones de sodio (SIBs) son una alternativa emergente a las baterías de iones de litio, utilizando sodio como ion principal en su proceso de carga y descarga. Su potencial radica en la abundancia de sodio en la corteza terrestre y los océanos, lo que las hace más económicas y sostenibles a largo plazo. Además, ofrecen mayor densidad de energía, estabilidad de ciclado y rentabilidad.

A diferencia de las baterías de iones de litio, las SIBs pueden ser no inflamables, no explosivas y fabricadas con materiales abundantes y no tóxicos, lo que las hace más seguras y limpias. Su densidad de energía puede ser de 1 a 5 veces mayor que la de las baterías de iones de litio, alcanzando hasta 140-160 Wh/kg en celdas de bolsa de 32 Ah, con una buena vida útil de ciclado de 1000 o 3000 ciclos.

Recientes avances en materiales de electrodos han mostrado un potencial para SIBs de alta densidad energética, con empresas como Faradion y HiNa liderando el desarrollo y comercialización de esta tecnología. Estas baterías tienen ventajas en seguridad, incluida la capacidad de almacenarse y transportarse a 0V, y han demostrado una capacidad de retención de energía del 99% a 55 °C y del 88% a -20 °C.

Las SIBs tienen aplicaciones diversas, desde el almacenamiento de energía en sistemas renovables hasta vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos portátiles y estacionarios, y sistemas de respaldo de energía. También se utilizan en aplicaciones industriales y de red eléctrica para gestionar la demanda de energía y estabilizar la red. (Zhao et al., 2023)

El voltaje típico de una SIB varía de 1.0 a 4.3 V durante el ciclo de carga y descarga, lo que las hace versátiles y adaptables a diferentes aplicaciones y requisitos de energía. Su gráfica de carga y descarga se presenta a continuación:

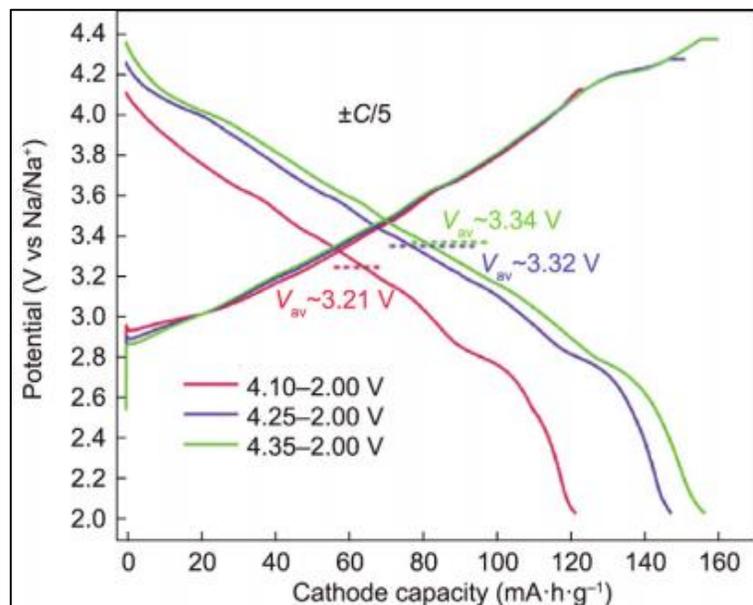


Ilustración 4: Curva de carga y descarga de una batería de Sodio. Tomado de: "Engineering of sodium-ion batteries: Opportunities and challenges"

- Baterías CR123

Las baterías CR123, también conocidas como DL123A, son una opción popular en una amplia gama de dispositivos debido a su potencia, durabilidad y rendimiento en condiciones extremas.

Estas baterías tienen una forma cilíndrica y utilizan una química de litio-manganeso (Li-MnO₂), lo que les proporciona un voltaje de 3 voltios y una capacidad que oscila entre 1400 y 1700 mAh. Con una vida útil de hasta 10 años, son ideales para dispositivos que requieren una fuente de energía fiable a largo plazo.

Su versatilidad se refleja en su amplio rango de aplicaciones, que incluyen cámaras digitales, linternas, equipos militares, dispositivos médicos, juguetes y más. Además, su alto rendimiento en climas extremos, que va desde -40°C hasta 185°C, las hace adecuadas para entornos adversos.

Entre sus ventajas se encuentra su capacidad para proporcionar ráfagas de energía intensa, su larga vida útil y su seguridad inherente, al ser no inflamables y no explosivos. Sin embargo, tienen algunas limitaciones, como su mayor costo en comparación con las baterías alcalinas y su naturaleza no recargable, lo que requiere una eliminación responsable para evitar la contaminación ambiental. (Sovi, 2024)

En la siguiente imagen se aprecia la curva de descarga de este tipo de baterías a distintas temperaturas.

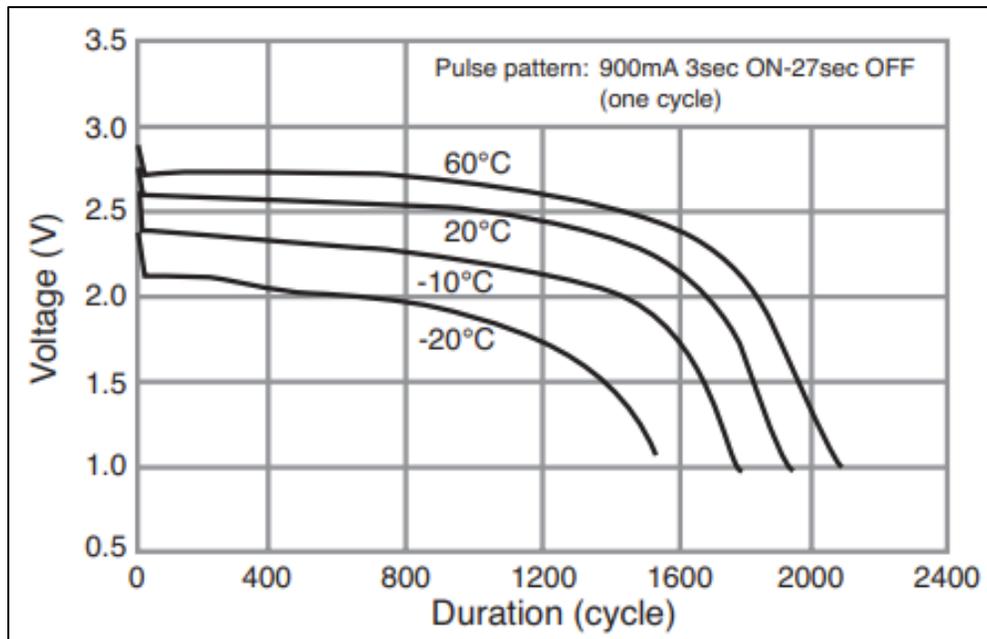


Ilustración 5: Curva de descarga de una batería CR123A. Tomado de: <https://www.mouser.com/c/ds/power/batteries/consumer-battery-photo-battery/?battery%20size=CR123A>

Metodología

En la implementación y optimización de sistemas de medición para aplicaciones industriales y de gestión de residuos, es esencial considerar diversos factores que impactan la precisión, fiabilidad y eficiencia del sistema. Esta sección aborda cinco aspectos críticos que son fundamentales para el desarrollo exitoso del proyecto: el peso y las cargas que pueden ser medidas, las opciones de volumen de las mismas cargas dentro de un contenedor de residuos, el protocolo inalámbrico para el envío de datos, la tasa de muestreo para la toma y el envío de estos, y el suministro de energía.

Peso y Cargas Medibles

El uso de celdas de carga tipo pancake con capacidad máxima de 2000 kg (referencia DYLF-102) ha demostrado ser eficaz en las pruebas iniciales. Sin embargo, es importante garantizar que el sistema pueda manejar una variedad de pesos, desde los más ligeros hasta los más pesados posibles dentro del rango especificado. Esto requerirá calibraciones precisas y una verificación constante de la exactitud de las mediciones bajo diferentes condiciones. Además, se debe evaluar el impacto de las vibraciones en las mediciones para asegurar que no afecten la precisión del peso registrado.

Opciones de Volumen para las Cargas

Es fundamental tener en cuenta el volumen de las cargas en relación con el contenedor de residuos donde se depositan. Para calcular con precisión el espacio ocupado por los residuos, se debe incorporar sensores de distancia y profundidad. Realizar pruebas exhaustivas es esencial para ajustar estos sensores y asegurar que puedan ofrecer datos precisos y fiables, incluso cuando los residuos presentan formas irregulares. La implementación de algoritmos que procesen estos datos para determinar el volumen total es crucial para obtener una representación exacta del espacio utilizado dentro del contenedor.

Protocolo Inalámbrico para el Envío de Datos

La implementación de un protocolo de comunicación inalámbrico es esencial para la transmisión eficiente de los datos medidos. Protocolos como LoRa, ZigBee o Wi-Fi pueden ser utilizados, dependiendo de la disponibilidad de infraestructura y las necesidades de alcance y consumo energético. En particular, el uso de Wi-Fi puede ser una opción óptima debido a su alta velocidad de transmisión y amplio soporte en la mayoría de los entornos. La elección del protocolo debe basarse en factores como el entorno operativo, la distancia de transmisión requerida y la frecuencia de envío de datos. Una vez seleccionado, se deben realizar pruebas exhaustivas para asegurar la robustez y fiabilidad de la transmisión de datos en diversas condiciones ambientales.

Tasa de Muestreo para la Toma y Envío de Datos

La definición de la tasa de muestreo debe equilibrar cuidadosamente la precisión de las mediciones y el consumo de energía. Un incremento en la tasa de muestreo proporcionará datos más precisos y actualizados, pero también conllevará un aumento en el consumo energético. Se puede probar inicialmente una tasa de muestreo de 1 Hz (una medición por segundo), ajustable según las necesidades del sistema y el comportamiento observado en las pruebas. Es crucial adaptar la tasa de muestreo para optimizar el consumo energético del sistema, considerando cómo se requiere eficiencia en la captura de datos. Además, la frecuencia de envío de datos puede ser optimizada para reducir el consumo de energía, enviando solo datos críticos o en intervalos predefinidos, y utilizando modos de bajo consumo entre los envíos.

Suministro de Energía

El suministro de energía es un componente crítico en la metodología del sistema. Se debe explorar el uso de fuentes de energía alternativas y de mayor capacidad, además de evaluar la eficacia de las baterías CR123A. Las baterías recargables, como las de iones de litio, pueden proporcionar una solución más sostenible y de mayor duración. La implementación de modos de ahorro de energía, como el modo "Deep Sleep" del microcontrolador, es esencial para maximizar la eficiencia energética. Asimismo, se debe considerar la integración de fuentes de energía complementarias, como paneles solares, para extender la vida útil del sistema en aplicaciones remotas o de difícil acceso.

Especificaciones del Sistema Sensor

En un primer paso, se realizó una exploración del transductor principal propuesto para su uso en el desarrollo del sistema. Este transductor es una celda de carga tipo pancake con una capacidad máxima de 2000 Kg, identificada con la referencia DYLF-102.

Las celdas de carga tipo pancake DYLF-102 son dispositivos utilizados para medir fuerzas de compresión y tracción en aplicaciones industriales y de investigación. Tienen una sensibilidad de $2.0 \pm 10\%$ mV/V. La precisión de estas celdas es notable, con una no linealidad de 0.05% de la escala completa y una repetibilidad de 0.03%. Están fabricadas en acero aleado con niquelado en la superficie para resistir la corrosión y son bidireccionales, permitiendo la medición tanto de fuerzas de tracción como de compresión. Además, pueden ser personalizadas según las necesidades específicas de aplicación. Estas características las hacen ideales para aplicaciones que requieren una medición precisa y confiable de fuerzas, como sistemas de pesaje, ensamblaje automatizado y básculas de tolva, gracias a su diseño compacto y alta estabilidad en entornos industriales exigentes. (Caltensor, 2024)

Comportamiento teórico

Las características principales de la celda DYLF-102 es su salida de 2.0 mV/V con un rango de alimentación desde 5 hasta 15 V (Caltensor, 2024). Para este proyecto se pensó en alimentar las celdas con 12V ya que las celdas necesitan ser probadas experimentalmente y para eso se piensa utilizar las fuentes de voltaje presentes en el laboratorio de Ingeniería Electrónica. Sabiendo el voltaje con el que se piensa alimentar la celda, se puede determinar su valor de salida máxima según como sigue.

$$V_{cc} = 12V$$

$$V_{out} = 12mV/V$$

$$V_{out_{max}} = 24mV$$

Sabiendo que la capacidad máxima es de 2000 Kg y que el fabricante asegura un comportamiento lineal del componente, solamente con los dos puntos extremos, mínima y máxima carga, se puede determinar el valor de la ecuación que modela el comportamiento de la celda.

$$0 \text{ Kg} \rightarrow 0 \text{ mV}$$

$$2000 \text{ Kg} \rightarrow 24mV$$

$$m = 0.012 \frac{mV}{Kg}$$

La ecuación que estaría representando el voltaje de salida en función de la masa en Kg de la carga colocada sobre la celda, para las condiciones de $V_{cc} = 12 \text{ V}$, sería:

$V_{out} = 0.012(x) [mV]$	(1)
---------------------------	-------

En donde x es el valor de la masa de la carga, medida en kilogramos (Kg), y la salida de voltaje está en la escala de los milivoltios. Esta ecuación modela el comportamiento de las cuatro celdas de carga que se van a utilizar en el proyecto.

Amplificación de los datos

Al ya tener el comportamiento teórico de las celdas de carga, existe un problema relacionado con la escala, consistente en (1) que modela el comportamiento de las celdas, ofrece un rango de salida en el orden de los milivoltios. Estos valores tan pequeños no son ningún inconveniente para instrumentos de medición especializados como los multímetros, pero si generan un problema a la hora de realizar mediciones con un microcontrolador.

Los microcontroladores presentan rangos específicos para los que ellos pueden iniciar a medir, independientemente del tipo de microcontrolador utilizado, para estos valores tan pequeños, el conversor Análogo-Digital (ADC) del microcontrolador va a tomarlos como un

valor de cero voltios. Por tal motivo se debe hacer una amplificación de la señal sin afectar a la misma.

Para estos casos de señales tan pequeñas, un amplificador de instrumentación es la opción correcta. El amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial tensión-tensión cuya ganancia puede establecerse de forma muy precisa y que ha sido optimizado para que opere aún en un entorno hostil. Su utilización es común en aparatos que trabajan con señales muy débiles, tales como equipos médicos (por ejemplo, el electrocardiógrafo), para minimizar el error de medida. (Drake Moyano, 2005)

En la siguiente imagen se aprecia el diagrama de circuito de un amplificador de instrumentación.

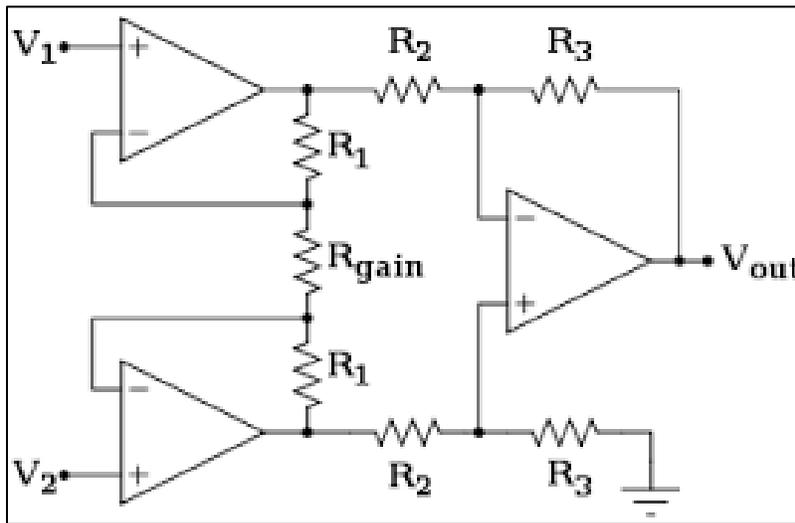


Ilustración 6: Circuito equivalente de un amplificador de instrumentación. Tomado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_de_instrumentaci3n

La ventaja del amplificador de instrumentación es que su ganancia de amplificación se controla mediante un elemento pasivo como lo es una resistencia, pero también se puede controlar mediante un elemento analógico (potenciómetro resistivo) o digital (conmutadores) lo que facilita su ajuste. La forma de calcular esa resistencia de ganancia depende específicamente del componente que se quiera utilizar.

Amplificación por 1000

La primera estrategia consiste en ampliar el rango del voltaje inicialmente, asegurando que al iniciar las mediciones los valores estén dentro del rango operativo estándar de voltios y puedan ser adecuadamente medidos por un microcontrolador. Para validar cómo se comportarán los datos finales, es crucial manipular la salida de voltaje de la celda.

$$V_{out} = V_{in} * 1000$$

$$V_{out} = 0.012(x) [mV] * 1000$$

$$V_{out} = 0.012(x) [V]$$

$V_{out} = 0.012(x) [V]$	(2)
--------------------------	-------

Si se evalúa tanto el mínimo como el máximo valor de masa que se puede medir con las celdas, se puede determinar cuánto sería el voltaje máximo que se puede alcanzar.

Masa (Kg)	Voltaje (V)
0	0
2000	24

Viendo los datos que se obtendrían, se puede concluir de primera mano que una amplificación solucionaría los problemas de mediciones de valores pequeños.

Por otro lado, sabiendo que se planea utilizar un amplificador de instrumentación, se debe tener en cuenta que estos componentes no pueden tener salidas de voltaje positivo mayores a su alimentación positiva. Como se planea alimentar las celdas de carga con 12 V y así mismo el amplificador de instrumentación, se puede entender que no se podría medir el máximo valor de masa que pueda aguantar la celda.

Como se planea alimentar a 12 V, lo máximo que puede salir del amplificador sería un voltaje igual de 12 V o cercano. Revisando la ecuación del voltaje de salida se obtiene que la máxima masa que se puede llegar a medir sería de 1000 Kg, reduciéndose a la mitad el valor de masa que pueda llegar a medirse.

Esta propuesta presenta un problema, ya que limita la cantidad de masa que se puede medir con las celdas. Además, si se planea utilizar un microcontrolador, este no podrá realizar mediciones de voltajes tan altos sin verse afectado. Por lo tanto, es necesario buscar una nueva solución de amplificación que permita medir todo el rango de masa soportado por la celda, sin dañar el amplificador de instrumentación ni el microcontrolador.

Amplificación por 400

A través de un enfoque experimental y basado en el método de prueba y error, manipulando la ecuación (1), se determinó que para lograr un voltaje dentro de un rango que no sea perjudicial para un amplificador de instrumentación se requería una ganancia de 400. Con este valor de ganancia, al medir el máximo posible en la celda, el voltaje de salida estaría por debajo de los 12 V permitido.

La ecuación que modelaría el nuevo comportamiento de la celda de carga luego de haber sido conectada a un amplificador de instrumentación sería:

$$V_{celda} = V_{in} * 400$$

$$V_{celda} = 0.012(x) [mV] * 400$$

$$V_{celda} = 0.0048(x) [V]$$

$V_{celda} = 0.0048(x) [V]$	(3)
-----------------------------	-------

Revisando nuevamente los valores de voltaje que se pueden obtener tanto para el valor mínimo y máximo de masa se tienen los siguientes datos:

Masa (Kg)	Voltaje (V)
0	0
2000	9.6

De los dos problemas planteados en la sección anterior, la amplificación con ganancia de 400 logra resolver el primero, el voltaje de salida del amplificador de instrumentación, pero es limitada para dar solución al problema de medir el voltaje obtenido mediante un microcontrolador sin que se ponga en riesgo el mismo.

Si bien la ganancia de 400 fue una idea bastante buena, se debe comprobar también por qué no se utilizaron otras ganancias para el ajuste de los datos. Estas comprobaciones se especifican en la siguiente tabla en donde se evalúan distintos valores de carga. Todos los valores de voltaje obtenidos ya se encuentran en el rango de los voltios.

G	Ecuación [V]	$V_{out}(0 Kg)$	$V_{out}(400 Kg)$	$V_{out}(1000 Kg)$	$V_{out}(2000 Kg)$
1	$0.000012(x)$	0	0.0048	0.012	0.024
100	0.0012	0	0.48	1.2	2.4
200	0.0024	0	0.96	2.4	4.8
300	0.0036	0	1.44	3.6	7.2
400	0.0048	0	1.92	4.8	9.6
500	0.0060	0	2.40	6.0	12
600	0.0072	0	2.88	7.2	14.4

Como se aprecia en la tabla, al aumentar la ganancia del amplificador, los voltajes obtenidos de la celda incrementan considerablemente. La ganancia máxima considerada es de 500, ya que una mayor ganancia provocaría que el voltaje de salida igualara al de alimentación del amplificador, lo cual no es recomendable.

Al analizar las ganancias de 100 y 200, se observa un problema con el valor de 400 kg, ya que, como se explicará en la siguiente sección, se espera que, con esta carga, la salida del amplificador operacional sea de cero voltios. Sin embargo, con estas ganancias, el valor de cero voltios está desplazado.

Para las ganancias de 300 y 400, el desplazamiento del voltaje en 400 kg es más notable. No obstante, también se destaca que, para las cargas de 1000 y 2000 kg, se pueden hacer aproximaciones que proporcionen una holgura, evitando estar al límite con los valores de los voltajes.

Se eligió la ganancia de 400, ya que permite establecer un rango de 2 a 10 V para medir las distintas cargas sobre las celdas, desde 400 kg hasta 2000 kg, gracias a la holgura que se permite en la medida. Este rango garantiza que las mediciones sean fiables y estables.

La siguiente cuestión es utilizar la holgura para acondicionar la señal de manera que el microcontrolador pueda interpretarla correctamente. Mediante software, se pueden realizar las correcciones necesarias en las ecuaciones que modelan el sistema total, evitando la dependencia de elementos externos.

En resumen, al seleccionar una ganancia adecuada y aplicar una holgura, se logra un sistema de medición robusto y preciso. Este enfoque permite que el sistema funcione de manera óptima, garantizando la fiabilidad de las mediciones y la estabilidad del sistema, todo ello con una adecuada integración con el microcontrolador para una mejor interpretación y ajuste de las señales.

Acondicionamiento de señal

Antes de iniciar con el análisis del acondicionamiento de la señal, se debe recordar que se van a utilizar cuatro celdas de carga para todo el sistema planteado. Así mismo, estas celdas estarán debajo de un contenedor en donde se depositarán los materiales, la masa aproximada del contenedor oscila entre 1500 Kg y 1600 Kg por lo que se espera que esta carga se distribuya de manera equitativa entre las cuatro celdas de carga ubicadas en los extremos del contenedor.

Teniendo esto entendido, cada celda va a estar siendo sometida por una carga de aproximadamente 400 Kg y la idea es que cada una termine soportando su carga máxima de 2000 Kg. Por tal motivo, el sistema general estaría dispuesto para medir un máximo de 8000 Kg.

Se plantea entonces que el rango de mediciones específicas para cada celda es de 400 Kg hasta los 2000 Kg. Siguiendo la ecuación obtenida para la ganancia de 400, la ecuación (3), se pueden establecer los valores mínimos y máximos de voltaje que van a ser generados y medidos.

$$V_{celda} = 0.0048(x) [V]$$

Para 400 Kg:

$$V_{celda}(400) = 0.0048(400) [V]$$

$$V_{celda}(400) = 1.92 [V]$$

Para 2000 Kg

$$V_{celda}(2000) = 0.0048(2000) [V]$$

$$V_{celda}(2000) = 9.6 [V]$$

Para tener un mejor control y no depender estrictamente de los valores de voltaje, se ajustarán los resultados para que, a 400 kg, el voltaje sea de 2 V y, a 2000 kg, sea de 10 V, tal como se mencionó en la sección anterior. Si al realizar la medida se obtiene un voltaje menor, no habrá problema, ya que se puede ajustar mediante software.

La siguiente tarea es acondicionar estos valores para que un microcontrolador los interprete correctamente. Dado que el sistema se alimentará con baterías, la opción considerada es utilizar un microcontrolador alimentado a 3.3 V para maximizar la eficiencia y prolongar la duración de la batería. Muchos microcontroladores de 3.3 V tienen un ADC que acepta lecturas desde 0 V hasta su valor de alimentación, y algunos incluso hasta 3.6 V.

Considerando esto, el rango de la señal que sale de la celda de carga debe acondicionarse para que sea de 0 V a 3.4 V, evitando llevar al máximo la capacidad del ADC del microcontrolador. Esto permitirá realizar los ajustes necesarios desde el software para un mejor control del sistema.

Ajustar los valores de voltaje y acondicionar la señal adecuadamente permite lograr un sistema eficiente y adaptable. Este enfoque no solo garantiza la precisión y fiabilidad de las mediciones, sino que también optimiza el uso de la batería y facilita la interpretación de las señales por parte del microcontrolador. Así, se asegura un rendimiento óptimo del sistema y una mayor durabilidad de los componentes involucrados.

Para esto se plantean las siguientes relaciones:

$$2 V \rightarrow 0V$$

$$10 V \rightarrow 3.4 V$$

Haciendo cálculos sobre pendiente y ecuación de la recta se tiene que la ecuación para hacer el acondicionamiento es

$V_{final}(V_{celda}) = 0.425(V_{celda}) - 0.85 [V]$	(4)
--	-----

Con la ecuación final del voltaje establecida, se procede a diseñar un circuito específico, haciendo uso principalmente de amplificadores operacionales. Estos amplificadores permitirán la implementación de la ecuación de manera que solo sea necesario añadir resistencias y condensadores para ajustar el voltaje de salida según sea necesario. Además, resulta más directo y sencillo sustituir la ecuación 3 en la ecuación 4 para obtener la ecuación final del voltaje, que definirá el comportamiento global del sistema.

$$V_{final}(V_{celda}) = 0.425(V_{celda}) - 0.85 [V]$$

$$V_{final}(x) = 0.425(0.0048(x)) - 0.85 [V]$$

$V_{final}(x) = 0.00204(x) - 0.85 [V]$	(5)
--	-----

Con esta ecuación final se puede revisar como van a ser los resultados de voltaje que se van a obtener para distintas masas medidas en kilogramos.

<i>Masa (Kg)</i>	<i>V_{out} (V)</i>
0	-0.85
100	-0.646
200	-0.442
300	-0.238
400	-0.034
500	0.170
700	0.578
1000	1.190
1300	1.802
1500	2.210
1700	2.618
1900	3.026
2000	3.230

Con la ecuación 5, se comprende mejor el comportamiento del sistema. Surge una preocupación respecto a masas entre 0 y 400 kg y la capacidad del ADC del microcontrolador para manejar voltajes negativos. Sin embargo, dado que las celdas de carga estarán debajo del contenedor, si cada celda recibe entre 300 y 400 kg, el microcontrolador puede interpretar el voltaje negativo como 0 V. Por lo tanto, se recomienda usar el contenedor desde el inicio de las pruebas del sistema.

Fuente de alimentación

Para garantizar el funcionamiento eficiente y confiable del sistema sensor desarrollado, es esencial diseñar una fuente de alimentación que satisfaga los requisitos específicos de cada componente. El microcontrolador, fundamental en el sistema por su eficiencia energética a 3.3V, requiere un suministro estable que puede ser gestionado mediante un convertidor DC-DC. Este componente asegura que la tensión de las baterías principales se ajuste adecuadamente para alimentar el microcontrolador y otros circuitos a bordo.

La celda de carga DYLF-102, utilizada para medir con precisión el peso de las cargas, necesita una alimentación consistente de 12V para operar de manera efectiva. Un convertidor DC-DC dedicado se encarga de proporcionar esta tensión específica, asegurando mediciones precisas y estables incluso bajo variaciones de carga y condiciones ambientales variables.

Además, los amplificadores operacionales empleados para amplificar y acondicionar las señales analógicas requieren una alimentación dual de +/-12V. Esta configuración de alimentación es crítica para garantizar la precisión y consistencia de las mediciones, optimizando el rendimiento del sistema en términos de sensibilidad y respuesta.

Es crucial diseñar la fuente de alimentación considerando también los requisitos de corriente de cada componente, asegurando que se pueda manejar de manera eficiente y segura la demanda eléctrica durante el funcionamiento normal y en condiciones adversas. Esto no solo

mejora la precisión de las mediciones, sino que también ayuda a minimizar posibles interferencias y fluctuaciones que podrían afectar la integridad de los datos recopilados.

Volumen Ocupado por El Sistema

Para asegurar la protección efectiva y el funcionamiento óptimo del sistema IoT en entornos adversos, el diseño del espacio protector debe considerar medidas clave. Se recomienda una caja compacta con dimensiones aproximadas de 10 cm de largo, 8 cm de ancho y 8 cm de alto, fabricada con materiales robustos como el plástico ABS o policarbonato. Estos materiales ofrecen resistencia a impactos, protección contra la humedad y el polvo, comunes en entornos de construcción y exteriores. (POLISANTAFE, s.f)

Es crucial integrar juntas de sellado de alta calidad para prevenir la entrada de polvo y agua, asegurando así la integridad del sistema frente a condiciones ambientales adversas. Además, la caja debe contar con puertos sellados para cables de alimentación, comunicación y sensores, facilitando la conectividad y el mantenimiento sin comprometer la protección del equipo.

Para permitir una instalación flexible, se deben incluir puntos de montaje o ranuras que permitan fijar la caja de manera segura en diferentes superficies, como paredes o estructuras. Asimismo, es crucial diseñar una ventilación adecuada mediante ranuras o rejillas para garantizar la disipación eficiente del calor generado por los componentes electrónicos, asegurando un funcionamiento óptimo y prolongando la vida útil del sistema.

Reservar espacio suficiente dentro de la caja para alojar el microcontrolador, la celda de carga, amplificadores operacionales y otros dispositivos es clave. Esto asegura que el sistema pueda operar de manera continua y confiable, adaptándose a diversas condiciones ambientales sin comprometer la precisión de las mediciones ni la funcionalidad del dispositivo.

Resultados

Como se mencionó en la sección anterior, el transductor principal que se va a utilizar es una celda de carga de tipo pancake modelo DYLF-102 de la marca CALT. El fabricante de este transductor asegura que el dispositivo se comporta de manera lineal según las variaciones en la carga y que se presentan ligeros cambios entre los resultados teóricos que se esperan con los obtenidos experimentalmente.

Por tal motivo, se debe analizar y probar el comportamiento de cada una de las celdas y seguir el mismo análisis establecido en la sección de metodología para verificar, corregir y determinar los valores reales con los que se espera trabajar cuando se estén utilizando estas celdas.

Dentro del análisis del comportamiento de las cargas se debe mencionar que estas van a ser utilizadas en forma de caracterización, por lo que las pruebas de carga que se le hagan no deben superar el 80% de la capacidad máxima ya que solo se debe observar y registrar su comportamiento. Dentro de estas pruebas hubo dos momentos principales, el primero fue la caracterización utilizando 6 pesas de 120 Lb cada una pertenecientes al laboratorio de Automatización Industrial del programa de Ingeniería Electrónica y el otro momento fue el uso de una máquina universal perteneciente al laboratorio de Estructuras y Materiales del programa de Ingeniería Civil.

Comportamiento experimental

Teniendo en cuenta el comportamiento teórico obtenido según la ecuación (1), es momento de determinar de manera experimental la veracidad de este y estipular como puede llegar a variar los datos obtenidos con cada celda de carga.

Para tener mejor control sobre los datos que se iban a obtener, se utilizaron 6 pesas cada una de 20 Lb y para las mediciones se utilizó un multímetro Wurth. La idea fue empezar sin nada de carga sobre la celda y luego ir apilando cada una de las pesas para aumentar la masa de la carga sobre la celda hasta completar 120 Lb. Así mismo, se hizo un aumento más de la masa utilizando a dos voluntarios para que se subieran encima del arreglo y se tomaron los datos correspondientes, sus respectivas masas en Kilogramos se convirtieron a libras para registrarlos correctamente.

En la siguiente tabla se aprecia como fueron los datos de entrada y las respectivas salidas. Las mediciones se repitieron ocho veces para tener mejor seguridad sobre los mismos y trabajar con los promedios de los voltajes obtenidos. Así mismo, se hizo la conversión de Lb a kilogramos para poder realizar correctamente las mediciones

		Reepeticiones									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Peso (Lb)	Peso (Kg)	Salida (mV)								Salida prom (mV)	Desv estandar
0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,0000
20,00	9,0718	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,105	0,0053
40,00	18,1437	0,22	0,21	0,21	0,20	0,23	0,22	0,22	0,23	0,218	0,0104
60,00	27,2155	0,34	0,33	0,33	0,31	0,35	0,33	0,32	0,32	0,329	0,0125
80,00	36,2874	0,45	0,45	0,43	0,44	0,46	0,44	0,44	0,47	0,448	0,0128
100,00	45,3592	0,58	0,56	0,53	0,56	0,56	0,55	0,54	0,56	0,555	0,0151
120	54,4311	0,66	0,67	0,67	0,69	0,67	0,68	0,67	0,66	0,671	0,0099
239,05	108,4313	1,33	1,32	1,32	1,33	1,32	1,30	1,34	1,34	1,325	0,0131
296,37	134,4312	1,66	1,68	1,67	1,68	1,69	1,70	1,68	1,67	1,679	0,0125

Ilustración 7: Resultados obtenidos con las pesas con voltaje sin amplificar. Fuente: Elaboración propia

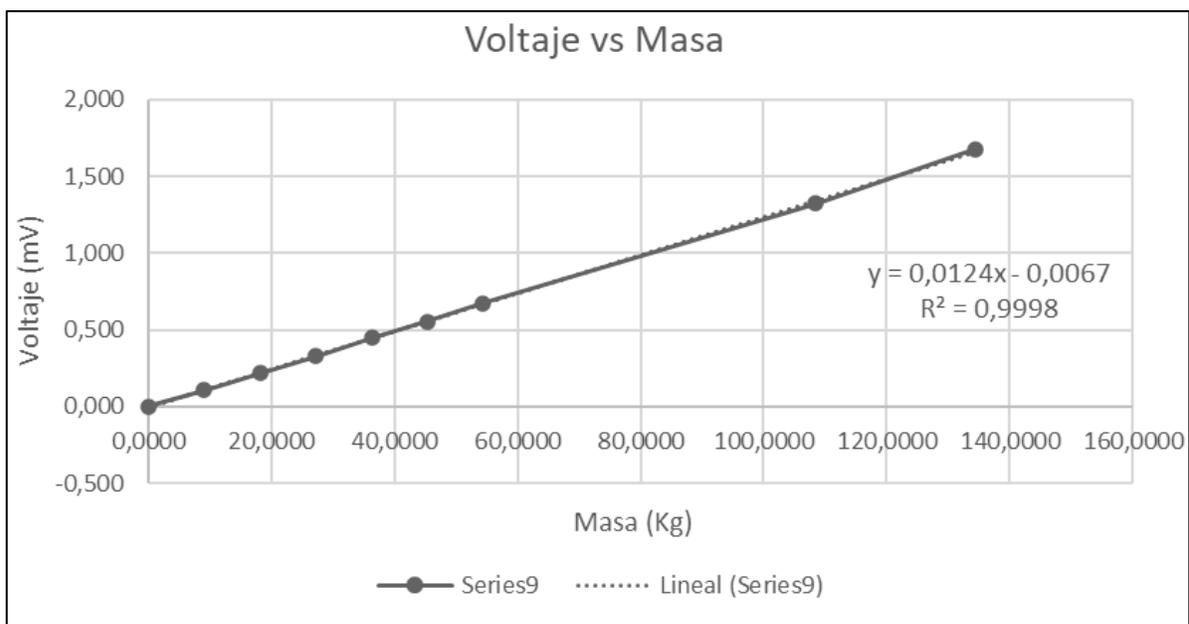


Ilustración 8: Comportamiento de los resultados obtenidos para las mediciones realizadas con las pesas. Fuente: Elaboración propia

Comparando la ecuación obtenida con la ecuación teórica se aprecia dos cambios importantes, el primero tiene que ver con la pendiente de la recta y la segunda con el corte con el eje Y. Estos cambios se comparan con el valor teórico obtenido en la siguiente tabla. Los datos presentados están en el rango de los milivoltios.

Dato	Teórico	Experimental	error absoluto
Pendiente	0.012 [mV]	0.0124 [mV]	0.0004 [mV]
Corte con eje Y	0 [mV]	-0.0067 [mV]	0.0067 [mV]
R^2	1	0.9998	0.0002

Se manejó el error absoluto como indicador porque este tipo de error es la relación directa que hay entre el valor real o teórico con el valor aproximado o medido. Al observar los valores obtenidos en el error absoluto, estos son muy pequeños por lo que se indica que los valores experimentales están cercas a los reales, también se hizo una comparación de los factores de correlación R^2 para verificar si la recta obtenida de manera experimental era cercana a la que se obtiene de manera teórica. Con estos resultados obtenidos, se concluye que hay una gran similitud entre las rectas experimentales y teóricas por lo que de ahora en adelante se va a utilizar netamente la ecuación experimental para validar el comportamiento según los análisis teóricos planteados en la sección de metodología. Cabe anotar que, en funcionamiento real, el ajuste del valor “cero” de amplitud depende del peso en vacío del contenedor.

Amplificación de los datos

Tal como se mencionó en la sección anterior y validando los datos experimentales, se aprecia que la salida de voltaje obtenido directamente desde la celda está en el rango de los milivoltios y para poder manipularlo correctamente se necesita un amplificador de instrumentación.

La ventaja principal del amplificador de instrumentación no solo es su versatilidad para amplificar sin problemas señales tan pequeñas si no también el hecho de que convierte un voltaje diferencial, como el que se obtiene de la celda, en un voltaje de un solo punto referenciado a otro, que generalmente es un plano de tierra electrónica.

En la siguiente ecuación se puede observar cómo es la ecuación de salida de un amplificador de instrumentación comercial:

$$V_{inst} = G * (V^+ - V^-) + V_{ref} [V]$$

Como el voltaje de referencia será un plano de tierra, cuyo voltaje es de 0 V, la ecuación se reduce a:

$$V_{inst} = G * (V^+ - V^-) [V]$$

La forma de calcular esa resistencia de ganancia depende específicamente del componente que se quiera utilizar. Para esta aplicación se pensó principalmente en un AD620 por la familiaridad en su uso y un INA129. Ambos tienen la misma forma de calcular la resistencia de ganancia R_g , pero difieren en cuestión como el rechazo en modo común o el voltaje de offset.

Amplificación por 1000

En este caso, para las dos referencias de amplificadores mencionadas anteriormente, la forma de calcular la resistencia R_g es:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

Siendo G el valor de la ganancia, para $G = 1000$.

$$R_G = 49.44 \Omega$$

Aproximando el valor de la resistencia a $R_G = 50 \Omega$ y acomodando la ecuación para encontrar el valor de la ganancia en función de la resistencia se tiene que:

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

$$G = 989$$

Ya teniendo estos valores listos, se realizó un circuito donde se incluía un amplificador operacional AD620 alimentado con una fuente dual de $\pm 12V$ la cual sirve para alimentar también la celda de carga. Se utilizaron nuevamente las pesas del Laboratorio de Automatización y se siguió la misma secuencia que se utilizó para verificar el comportamiento de cada una de las celdas de carga.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos para una de las celdas y así mismo, la gráfica que los relaciona.

		Datos obtenidos									
		1	2	3	4	5	6	7	8		
Peso (Lb)	Peso (Kg)	Salida (V)								Salida prom (V)	desv estandar
0	0,0000	0,025	0,018	0,014	-0,006	0,013	0,017	0,013	-0,010	0,011	0,0121
20	9,0718	0,135	0,141	0,143	0,123	0,137	0,134	0,141	0,131	0,136	0,0065
40	18,1437	0,253	0,262	0,249	0,256	0,248	0,250	0,248	0,252	0,252	0,0048
60	27,2155	0,381	0,385	0,384	0,370	0,374	0,379	0,371	0,369	0,377	0,0064
80	36,2874	0,503	0,505	0,498	0,491	0,493	0,507	0,490	0,483	0,496	0,0084
100	45,3592	0,619	0,615	0,618	0,619	0,617	0,620	0,618	0,607	0,617	0,0042
120	54,4311	0,731	0,735	0,730	0,733	0,735	0,732	0,711	0,736	0,730	0,0081

Ilustración 9: Resultados obtenidos con las pesas con voltaje amplificado por 100. Fuente: Elaboración propia

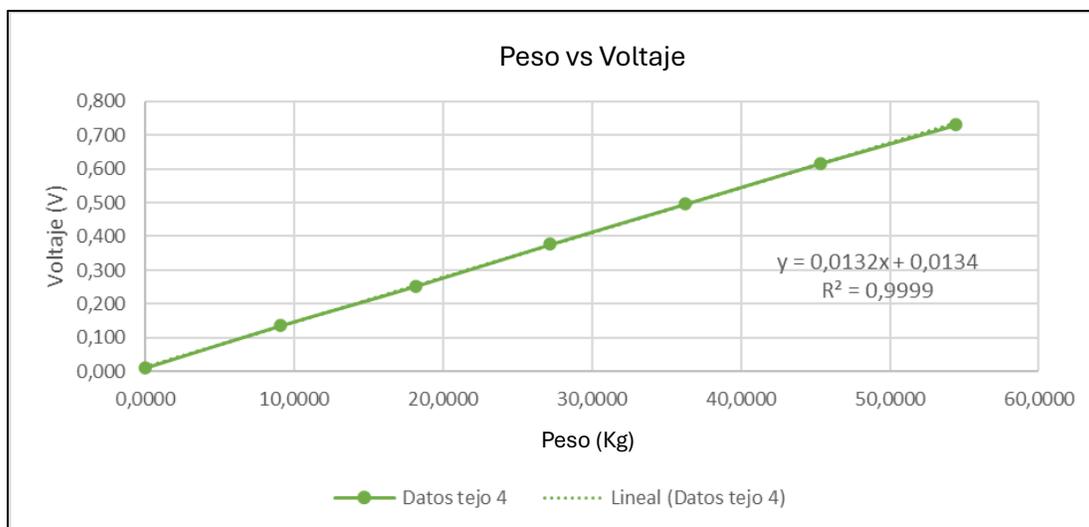


Ilustración 10: Comportamiento de los resultados obtenidos para las mediciones realizadas con las pesas con el voltaje amplificado por 1000. Fuente: Elaboración propia

Se aprecian dos cosas de primera mano, la primera es que el valor de la pendiente cambió un poco, pero esto se debe a la ganancia que al final estaba siendo utilizada puesto que se utilizó una resistencia $R_G = 50 \Omega$. Lo segundo es que, al estar midiendo en el rango de los voltios, se presentaba mejor precisión al momento de tomar la medición por lo cual aparecen más decimales en la medida final.

Ya con los dos posibles amplificadores que se podían utilizar en el montaje final, se podía tener mejor conocimiento sobre el voltaje máximo de salida permitido para el problema presentado en la sección de metodología y es que para los 2000 Kg, el voltaje de salida iba a ser cercano a 24 V. En la siguiente gráfica se resume los valores máximos de salida permitidos para las referencias de amplificadores mencionadas.

Referencia	Voltaje de salida	+Vs = 12 V
AD620	$+V_s - 1.2$	10.8
INA129	$+V_s - 0.9$	11.1

Independientemente de la referencia del amplificador que se utilice, existe el problema de que al amplificar por 1000, el voltaje de salida supera el límite permitido, lo que causará la saturación del amplificador y perjudicará las mediciones.

Amplificación por 400

Para un valor de ganancia de 400, el valor de la resistencia obtenido fue de $R_G = 123.8 \Omega$, en este caso, para no tener que volver a hacer alguna aproximación con resistencias comerciales, se plantea el uso de una resistencia variable tipo Trimmer para poder controlar de manera más precisa el valor de la resistencia, obviamente midiendo antes de energizar para tener seguridad del valor de la resistencia.

Con esta solución planteada, se decidió realizar un cambio en la toma de los datos solo para tener seguridad de que las celdas de carga sean completamente lineales para distintos tipos de masa que estén sobre ella. Por tal motivo, se procedió segundo momento de las mediciones, por lo que se hizo uso de la máquina universal mencionada al inicio de esta sección, con esto máquina se hicieron pruebas para cargas desde los cero hasta los 1500 Kg en distintos saltos para cada una de las celdas de carga.

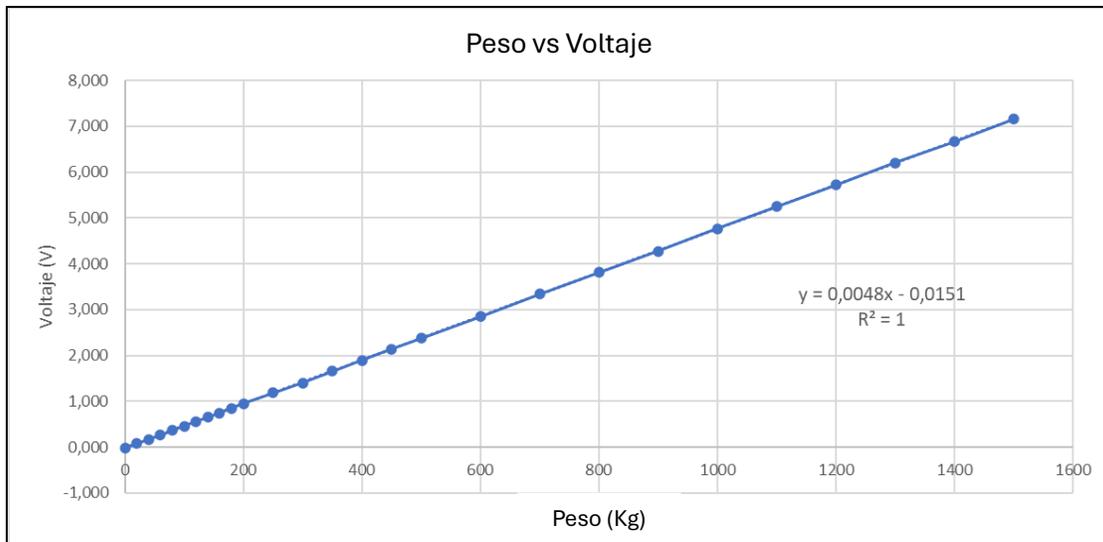


Ilustración 11: Comportamiento de los resultados obtenidos para las mediciones realizadas con la máquina universal, con voltaje amplificado por 400. Fuente: Elaboración propia

La gráfica de la recta obtenida para una de las celdas se aprecia en la imagen anterior y los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Peso (Kg)	Datos obtenidos				Salida prom (V)	desv estandar
	1	2	3	4		
0	-0,019	-0,014	-0,014	-0,014	-0,015	0,0025
20	0,070	0,083	0,074	0,078	0,076	0,0056
40	0,162	0,179	0,167	0,167	0,169	0,0072
60	0,242	0,272	0,262	0,263	0,260	0,0127
80	0,362	0,377	0,370	0,365	0,369	0,0066
100	0,456	0,475	0,458	0,468	0,464	0,0089
120	0,558	0,562	0,561	0,571	0,563	0,0056
140	0,652	0,662	0,649	0,658	0,655	0,0059
160	0,744	0,746	0,749	0,756	0,749	0,0053
180	0,852	0,856	0,848	0,854	0,853	0,0034
200	0,941	0,945	0,954	0,949	0,947	0,0056
250	1,195	1,187	1,188	1,189	1,190	0,0036
300	1,331	1,424	1,422	1,443	1,405	0,0502
350	1,657	1,657	1,661	1,675	1,663	0,0085
400	1,875	1,888	1,896	1,915	1,894	0,0167
450	2,161	2,131	2,118	2,152	2,141	0,0196
500	2,390	2,369	2,350	2,394	2,376	0,0204
600	2,845	2,846	2,837	2,867	2,849	0,0128
700	3,346	3,339	3,313	3,348	3,337	0,0161
800	3,815	3,815	3,785	3,825	3,810	0,0173
900	4,269	4,287	4,259	4,298	4,278	0,0175
1000	4,749	4,785	4,751	4,782	4,767	0,0194
1100	5,216	5,255	5,228	5,278	5,244	0,0278
1200	5,696	5,749	5,709	5,739	5,723	0,0249
1300	6,176	6,220	6,178	6,220	6,199	0,0248
1400	6,610	6,700	6,650	6,700	6,665	0,0436
1500	7,140	7,170	7,130	7,190	7,158	0,0275

Ilustración 12: Resultados obtenidos para las mediciones realizadas con la máquina universal, voltaje amplificado por 400. Fuente: Elaboración propia

Se hicieron las pruebas hasta 1500 para asegurar la integridad de la propia celda además porque el ejercicio que se estaba realizando correspondía, como todos los demás, a una caracterización del comportamiento de la celda y estas caracterizaciones, según palabras de los operarios del Laboratorio de Estructuras, no puede sobre pasar el 80% de la carga máxima permitida. Así mismo, con todos los datos obtenidos se puede tener una buena tendencia de estos para determinar el modelo que representa el comportamiento de la celda.

Siguiendo la ecuación de la recta obtenida, se puede determinar el valor del voltaje máximo que se puede llegar a obtener.

$$V_{out}(x) = 0.0048x - 0.0151 [V]$$

$$V_{out}(2000) = 0.0048(2000) - 0.0151[V]$$

$$V_{out}(2000) = 9.5849 V$$

El valor del voltaje máximo obtenido cuando la carga sea la máxima soportada por la celda está cercano a los 10 V. Por tal motivo, se concluye que la ganancia de 400 es la óptima para evitar que el amplificador no se sature ni se dañe.

Acondicionamiento de señal

Siguiendo la ecuación obtenida experimentalmente para la ganancia de 400, se pueden establecer los valores mínimos y máximos de voltaje que van a ser generados y medidos.

Para 400 Kg:

$$V_{out}(400) = 0.0048(400) - 0.0151$$

$$V_{out}(400) = 1.904$$

Para 2000 Kg:

$$V_{out}(2000) = 0.0048(2000) - 0.0151$$

$$V_{out}(400) = 9.5849$$

Realizando una comparación con los valores teóricos, se aprecia que los valores obtenidos experimentalmente no están tan alejados y dan certeza que los cálculos se realizaron correctamente. En la siguiente tabla se compara los valores obtenidos experimentalmente como los teóricos, los valores registrados ya se encuentran en el rango de los voltios.

Dato	Teórico	Experimental	Error absoluto
Pendiente	0.0048	0.0048	0
Corte con eje Y	0	-0.0151	0.0151
Para 400 Kg	1.92	1.904	0.016
Para 2000 Kg	9.6	9.5849	0.0151

Revisando el valor del error absoluto, se aprecia nuevamente que la ecuación obtenida de manera experimental es similar a la teórica y no se encuentra tan alejada de la misma, por lo que su uso en los siguientes análisis es correcto.

Como el sistema se piensa que sea alimentado por baterías, lo mejor opción para un microcontrolador es aquel que sea alimentado a 3.3V para tener mayor eficiencia y ahorrar batería; un gran candidato fue el ESP32 de Expressif que entre sus características principales es que es muy útil para aplicaciones IoT y también tiene un ADC que acepta lecturas desde los 0 V hasta los 3.3V con un máximo de 3.6 V.

Teniendo esto en cuenta, se había planteado un acondicionamiento de la señal de tal manera que se aprovechara el comportamiento lineal del sensor. La ecuación obtenida se presentó como:

$$V_{out}(V_{celda}) = 0.425V_{celda} - 0.85$$

La cuestión ahora es crear el circuito que realice esa ecuación mediante amplificadores operacionales teniendo cuidado con los valores de las resistencias para evitar efectos de carga. Principalmente se realizó un circuito que realice la multiplicación por un factor de 0.425, se escoge la configuración de amplificador inversor que permite ganancias menores a uno, pero con la salvedad que el voltaje de salida está invertido.

Para la parte del nivel DC, el corte con el eje Y, se planteó un seguidor de voltaje alimentado por una resistencia variable, tipo Trimmer, conectada a una fuente de alimentación de 3.3V. La parte que une todo es un sumador tipo inversor con ganancia unitaria. El hecho de utilizar el sumador inversor es para que cambie los signos de las salidas de los operacionales y se tenga la ecuación final. Esto se puede ver en la siguiente ecuación que sigue el comportamiento del sumador inversor.

$$V_1 = 0.85 \text{ V}$$

$$V_2 = -0.425V_{celda}$$

$$V_{out} = -(V_1 + V_2)$$

$$V_{out} = -V_1 - V_2$$

$$V_{out} = -0.85 - (-0.425V_{celda})$$

$$V_{out} = 0.425V_{celda} - 0.85 \text{ [V]}$$

Simulación del diseño

En la siguiente imagen se muestra el circuito final armado en una simulación realizada con el software Proteus, junto con algunas gráficas del comportamiento del voltaje de entrada y de salida total. En la simulación, se utilizó una fuente tipo Piecewise Linear para representar los valores de los voltajes obtenidos de la celda después de la etapa de amplificación. Dado que los voltajes son lineales, se programó la simulación para que incrementara en intervalos de 0.5

segundos con aumentos de 0.5V. Al alcanzar el máximo de 10V, se hizo un descenso en intervalos de 0.5V hasta llegar a cero voltios nuevamente.

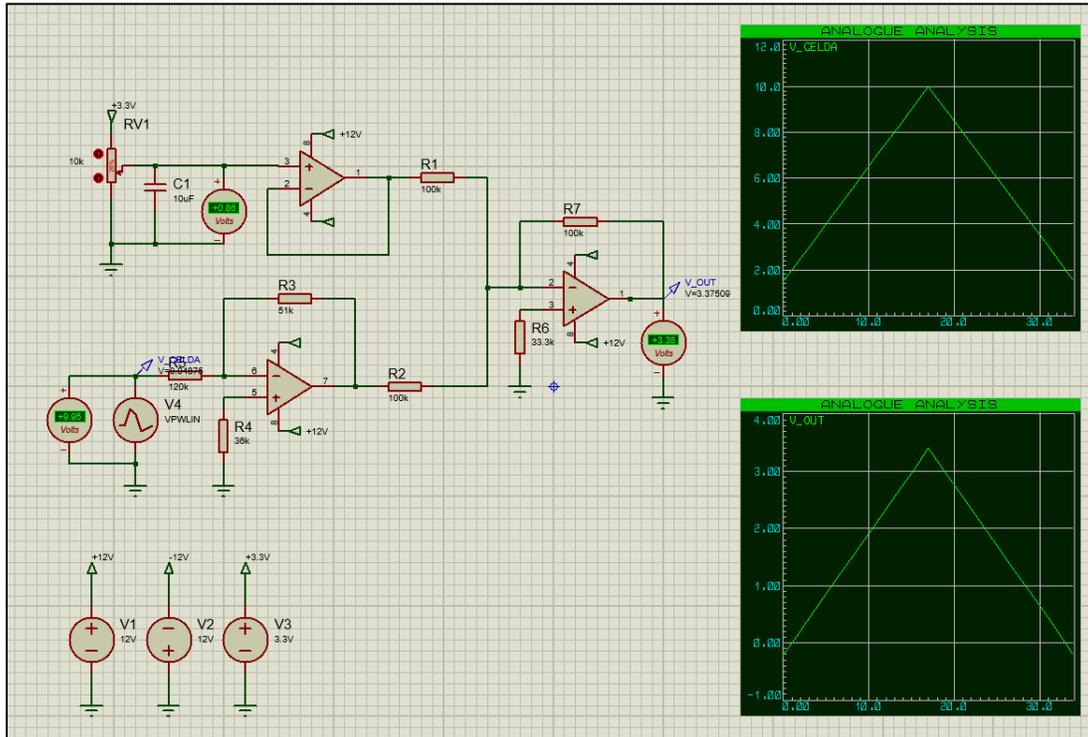


Ilustración 13: Esquema de simulación del circuito que representa la ecuación de transformación de voltaje.
Fuente: Elaboración propia

Los valores de las resistencias fueron calculados y escogidos de tal manera que no se hiciera efecto de carga entre ningún operacional y además se agregaron resistencias para evitar corrientes de fuga y un condensador para filtrar la salida del Trimmer en cuanto a ruido que pueda generarse por la fuente de 3.3V.

Así como se hizo en la sección 4, se reemplazará la ecuación experimental obtenida para una de las celdas dentro de la ecuación de adecuación de voltaje para validar y comparar los posibles resultados que se obtendrían con los que se determinaron de manera teórica.

$$V_{out} = 0.425V_{celda} - 0.85 [V]$$

$$V_{out} = 0.425(0.0048x - 0.0151) - 0.85 [V]$$

$$V_{out} = 0.00204x - 0.0064175 - 0.85[V]$$

$$V_{out} = 0.00204x - 0.8564175 [V]$$

En la siguiente tabla se harán las comparaciones para cada una de las ecuaciones con distintos valores de masa medida en Kilogramos. Los datos se van a aproximar a 3 decimales.

<i>Masa (Kg)</i>	V_{out} teoría (V)	V_{out} experimento (V)	Error absoluto
0	-0.850	-0.856	0.006
100	-0.646	-0.652	0.006
200	-0.442	-0.448	0.006
300	-0.238	-0.244	0.006
400	-0.034	-0.040	0.006
500	0.170	0.164	0.006
700	0.578	0.572	0.006
1000	1.190	1.184	0.006
1300	1.802	1.796	0.006
1500	2.210	2.204	0.006
1700	2.618	2.612	0.006
1900	3.026	3.020	0.006
2000	3.230	3.224	0.006

Diseño de PCB

Para el diseño de la PCB se utilizó el software Altium Designer para el cual la universidad cuenta con licencia para los estudiantes de ingeniería electrónica. En este diseño se pensó en una PCB que fuera a doble cara debido a que se presentan las siguientes ventajas que una PCB de capa sencilla. (Mokotechnology, 2019)

- Mayor densidad de componentes y diseño compacto.
- Mejores opciones de ruta.
- Integridad de señal mejorada
- Conexión a tierra y distribución de energía mejorada

Dentro de las mejoras expuestas, las más importantes son el diseño compacto y la conexión a tierra. Con un diseño compacto se puede tener mayor flexibilidad en el transporte de la PCB, así como su adecuación dentro de un compartimiento especial solo para que pueda ser guardada, con una conexión a tierra distribuida y separada en cada una de la cara se puede tener un punto de tierra bien definido para todas las conexiones de los componentes del circuito final, así como una ayuda para que el voltaje de la batería no llegue a quedar flotante y no se pueda tener buenas mediciones.

En la siguiente imagen se presentan el diseño final de la PCB tanto en su cara superior como inferior, así como la disposición de los componentes que se van a utilizar.

Cara superior:

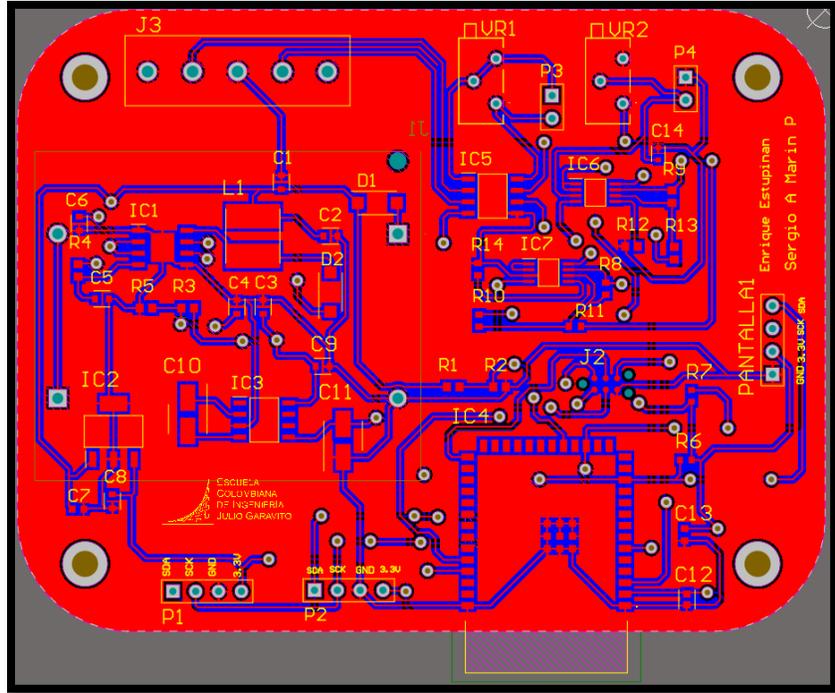


Ilustración 14: Cara superior PCB.

Cara inferior:

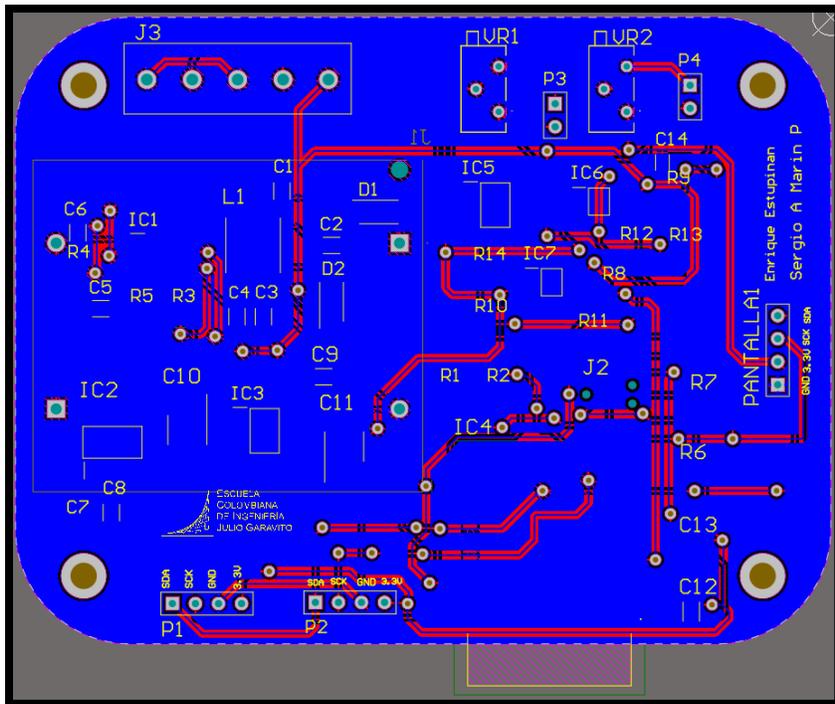


Ilustración 15: Cara inferior PCB.

Así mismo, se presenta un modelo en 3D generado con el propio Altium para determinar cómo va a quedar la placa cuando se posicionen todos los componentes finales.

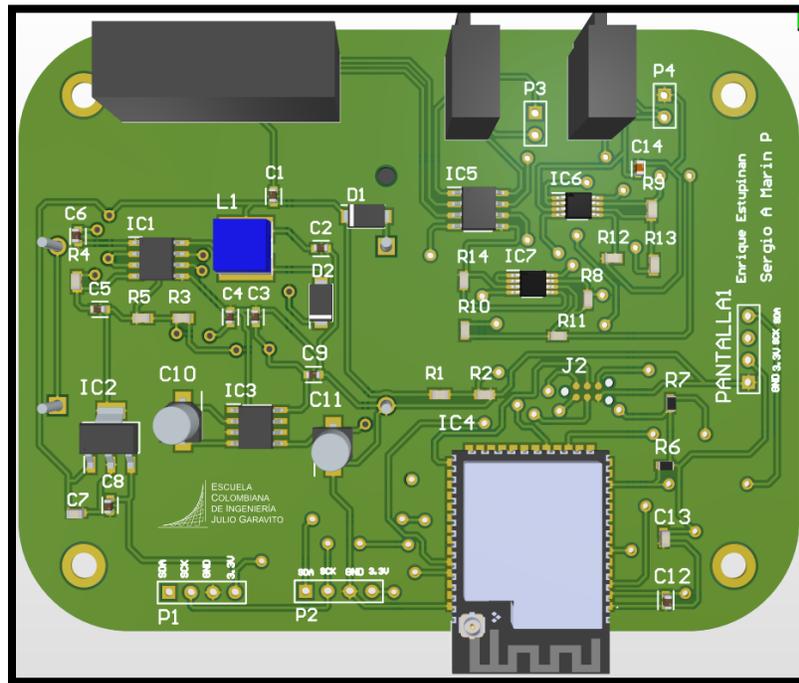


Ilustración 16: Modelo 3D de toda la PCB con componentes.

Materiales utilizados

Tal y como se pudo evidenciar a lo largo del documento, en el apartado de los resultados se mencionaron diversas referencias de materiales aptos para la construcción del sistema en cuestión. La considerable experiencia acumulada durante la carrera universitaria influyó en la elección directa de materiales previamente conocidos.

Si bien la experiencia previa fue un factor determinante en la selección de materiales y en el armado del circuito, el aspecto económico también jugó un papel crucial en el desarrollo del sistema. Aunque existían materiales de excelente calidad y con un comportamiento ya conocido que se adaptaban fácilmente a las necesidades del proyecto, su costo era demasiado elevado. Por este motivo, se realizó una búsqueda exhaustiva de materiales que pudieran cumplir de manera ajustada con los requerimientos del proyecto.

Durante el desarrollo del prototipo funcional, surgió un primer problema relacionado con la alimentación de los amplificadores operacionales que se iban a utilizar. El desafío consistía en replicar el comportamiento observado en los ensayos de laboratorio, realizados con una fuente dual de $\pm 12V$, y asegurar que todos los resultados obtenidos fueran consistentes con estos voltajes de alimentación en los amplificadores. Para solucionar esto, se optó por utilizar un conversor DC-DC que invirtiera la polaridad del voltaje, evaluando cuidadosamente su costo para que se ajustara a las necesidades del proyecto sin comprometer el presupuesto.

De igual manera, la fabricación de la PCB siguió un proceso de selección similar al de los materiales. En este caso, la experiencia previa fue fundamental, ya que fabricar las PCBs en el extranjero resultó ser más económico y el acabado fue más profesional, sin incurrir en costos adicionales. La única restricción fue el tamaño de la placa, que no podía exceder los 100 x 100 mm. Esta limitación no representó un obstáculo, ya que todo el sistema se diseñó para ser portátil y manejable para el usuario.

En conclusión, la lectura continua y el análisis de distintos tipos de componentes fueron cruciales para el éxito del sistema y la optimización de su construcción. La combinación de experiencia previa, selección adecuada de materiales y consideraciones económicas permitió desarrollar un sistema funcional, eficiente y accesible, cumpliendo con todos los objetivos planteados.

Montaje final y consideraciones

El montaje final de todo el sistema se puede apreciar en las siguientes imágenes:

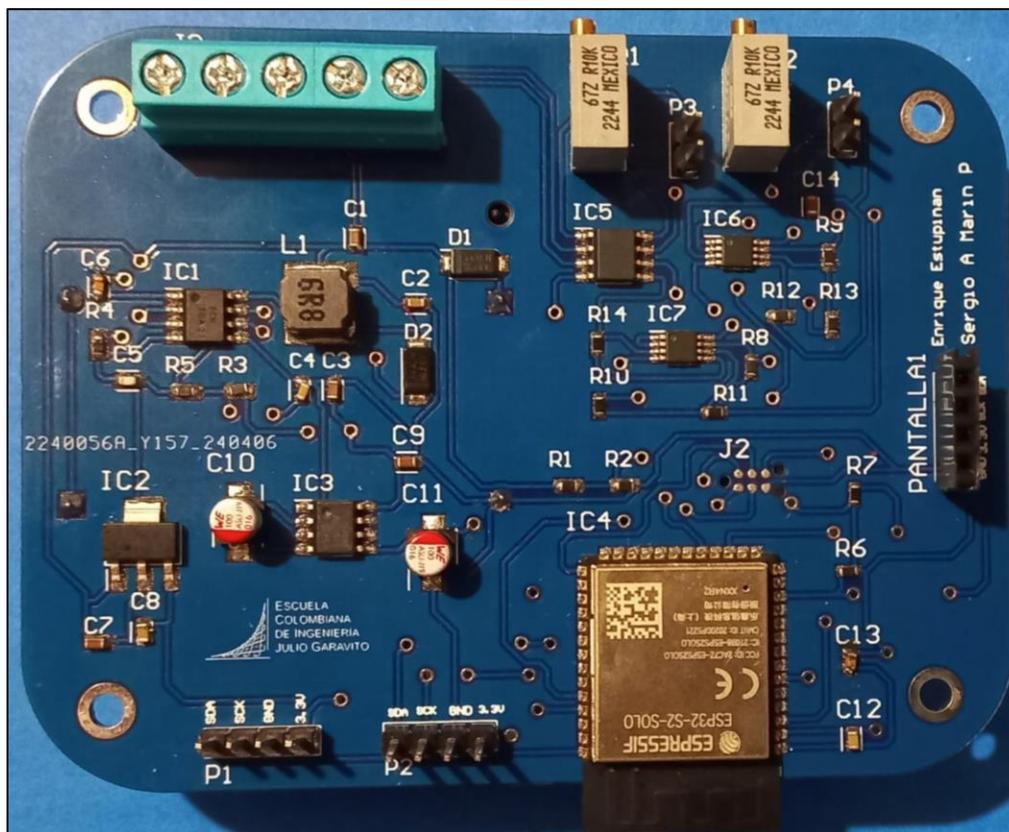


Ilustración 17: Montaje final de la PCB en su cara superior.

El sistema utiliza componentes de montaje superficial y se empleó un horno especial de soldadura en el Laboratorio de Práctica Libre de Ingeniería Electrónica. Se realizaron correcciones en las soldaduras con cautín y soldadura de estaño convencional. El diseño es

compacto, portátil y puede ubicarse en cualquier lugar. Cuenta con dos potenciómetros para ajustar la ganancia de amplificación y el nivel de voltaje DC en el arreglo de amplificadores operacionales, transformando los voltajes para ser leídos por un microcontrolador. La configuración y ajustes se realizan mediante software.

La PCB está sectorizada en tres partes principales: potencia y alimentación, acondicionamiento de señal y programación, para evitar interferencias eléctricas, especialmente en las señales milivoltios de las celdas de carga. El protocolo I2C utilizado para la comunicación con sensores y la pantalla OLED requiere sectorización para evitar pérdida de conexión y asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

Se verificó el diseño mediante una prueba de cortocircuito, utilizando una fuente de voltaje y corriente variable. Se estableció el voltaje de alimentación en 6 V y la corriente se mantuvo constante alrededor de 100 mA. El sistema incluye tres puertos de conexión I2C, uno destinado a una pantalla OLED de 128x64 bits que muestra el voltaje medido, la masa del elemento, el voltaje de la batería y datos de otros sensores. Se planea agregar un sensor de distancia tipo Time of Flight.

Para ahorrar batería, el microcontrolador se programa en modo "Deep Sleep", activándose a intervalos regulares para realizar mediciones y proyectar valores en la pantalla. Inicialmente, estos intervalos son de 5 o 10 minutos, con la intención de extenderlos a 30 minutos o una hora para un uso más eficiente de la batería. Los intervalos pueden personalizarse según las necesidades específicas.

El circuito se alojará en un estuche que lo protegerá de las inclemencias del tiempo y facilitará su revisión sin desmontar la estructura. Este estuche protegerá la antena del microcontrolador, evitando daños por manipulación incorrecta. El diseño del estuche garantiza que todos los componentes estén seguros y accesibles, mejorando la durabilidad y facilidad de mantenimiento del sistema.

Conclusiones

- El sistema implementado se caracteriza por ser compacto y fácil de transportar, lo que facilita su uso en diversas ubicaciones. Se integraron dos potenciómetros para ajustar la ganancia de amplificación y el nivel de voltaje DC de los amplificadores operacionales, con ajustes adicionales posibles mediante software, aportando flexibilidad y precisión en su funcionamiento.
- Se decidió sectorizar la PCB en tres partes principales (potencia y alimentación, acondicionamiento de señal, y programación) para minimizar las interferencias eléctricas. Esta sectorización es crucial para la medición precisa de las señales de milivoltios de las celdas de carga. Además, se implementó el protocolo I2C para la comunicación con sensores y la pantalla, gestionando cuidadosamente las interferencias para evitar pérdida de datos o errores de comunicación.
- Para maximizar la eficiencia energética del dispositivo IoT, se implementó un modo "Deep Sleep" en el microcontrolador, que se activa automáticamente para realizar mediciones y proyectar valores en la pantalla. Esto minimiza el consumo de energía y extiende significativamente la vida útil de la batería, asegurando un funcionamiento prolongado sin recargas frecuentes. La programación flexible permite adaptar el sistema a diversas condiciones operativas, manteniendo su eficiencia sin comprometer la precisión y fiabilidad de las mediciones.
- El sistema utiliza dos baterías CR123A, cada una con una capacidad de 3V y una densidad de energía de 1550 mAh. Durante todas las pruebas realizadas, estas baterías demostraron un excelente desempeño, sin presentar fallas ni descargas significativas. La alta densidad de energía permitió un funcionamiento prolongado y confiable del sistema, soportando las demandas de energía sin necesidad de recargas frecuentes.
- El desarrollo de esquemáticos eléctricos detallados y la integración eficiente de los circuitos impresos en los nodos transductores se realizó con éxito. Esto garantizó una conexión eléctrica adecuada y una disposición espacial eficiente, optimizando el rendimiento del sistema de medición. La elaboración de estos esquemáticos fue clave para el funcionamiento óptimo de los sensores y su acondicionamiento de señales.
- Se logró integrar transductores altamente precisos que permiten medir de manera confiable el peso y la profundidad de los sensores, posibilitando la estimación precisa del volumen del residuo. Esta integración facilitó la obtención de datos simultáneos y precisos, mejorando la eficacia y la confiabilidad del proceso de medición.
- No se logró alcanzar plenamente el objetivo de "Validación y Optimización del Sistema Implementado" debido a que no se pudieron realizar las pruebas exhaustivas con el sistema completo. Esta falta de pruebas impidió verificar la precisión y confiabilidad

del sistema, así como la fusión de información proveniente de diversos sensores de distancia y profundidad. Como resultado, no se pudo mejorar la eficiencia y precisión del sistema de medición en su conjunto.

- Aunque se planificó diseñar un case específico para resguardar el circuito y protegerlo contra la intemperie, así como para facilitar su revisión sin necesidad de desmontar toda la estructura, este objetivo no se alcanzó debido a obligaciones externas del estudiante. Además, el case tenía la función crucial de proteger la antena del microcontrolador, que quedó fuera de la placa principal y podría dañarse fácilmente por un mal manejo o movimiento brusco. Este diseño del case permanece como un pendiente importante para ser retomado en el futuro, asegurando la integridad y durabilidad del sistema completo.

Planes a futuro y líneas de trabajo

Una de las primeras acciones a considerar es la validación y optimización del sistema implementado. Es fundamental realizar pruebas exhaustivas con el sistema completo para verificar su precisión y fiabilidad. Esto permitirá validar el rendimiento del sistema de medición y optimizar la fusión de datos provenientes de los sensores de distancia y profundidad, garantizando así la exactitud y confiabilidad necesarias para su operación efectiva.

El diseño y fabricación de un case protector es otro objetivo crucial. Este case no solo resguardará el circuito contra la intemperie, sino que también protegerá la antena del microcontrolador, la cual es susceptible a daños por mal manejo o movimientos bruscos. Además, el case facilitará la revisión del circuito sin necesidad de desmontar toda la estructura, asegurando la integridad y durabilidad del sistema.

Para mejorar la gestión de interferencias eléctricas, es importante optimizar la sectorización de la PCB y la gestión de interferencias en la comunicación I2C. Minimizar el ruido eléctrico y evitar la pérdida de datos o errores de comunicación son aspectos clave que mejorarán significativamente la fiabilidad del sistema.

En cuanto a la fuente de energía, se debería evaluar el uso de otras baterías o fuentes de energía con mayor capacidad y eficiencia. Esto no solo prolongará la vida útil del dispositivo, sino que también mejorará su sostenibilidad energética, permitiendo un funcionamiento prolongado sin la necesidad de recargas frecuentes.

Desarrollar nuevas funcionalidades y ajustes adicionales en el software es otro paso importante. Ampliar las capacidades del sistema mediante software incrementará su flexibilidad y precisión, permitiendo que se adapte a diversas condiciones operativas y nuevas aplicaciones IoT, mejorando así su funcionalidad y aplicabilidad.

Gracias a la implementación del protocolo de comunicaciones I2C, se espera agregar sensores adicionales que utilicen o puedan adaptarse a este protocolo. En particular, la incorporación de una cámara para el reconocimiento visual del tipo de residuo en el contenedor será de gran utilidad. Esta cámara deberá ser compatible con el protocolo I2C o adaptarse para utilizarlo, añadiendo una capa extra de funcionalidad y precisión en la clasificación de residuos.

Además, se propone el uso de una pantalla OLED más grande que abarque un área mayor, lo que mejorará la interfaz humano-máquina y permitirá una mejor visualización de los datos. Esto hará que la interacción con el sistema sea más amigable e intuitiva para los usuarios.

Realizar pruebas del sistema en diversas condiciones ambientales ayudará a evaluar su desempeño en diferentes entornos. Esto asegurará que el sistema funcione correctamente bajo variadas circunstancias, garantizando su robustez y fiabilidad en aplicaciones del mundo real.

La elaboración de una documentación detallada del sistema y el establecimiento de estándares de calidad son esenciales para facilitar la replicabilidad del proyecto. Esto

asegurará que se mantenga la calidad en futuras implementaciones y que cualquier modificación o mejora esté bien documentada y sea accesible para otros desarrolladores.

Finalmente, es importante explorar nuevos mercados y aplicaciones potenciales para el sistema. Identificar y analizar oportunidades en diferentes industrias expandirá el alcance del proyecto, abriendo nuevas posibilidades de implementación y desarrollo. Esto no solo incrementará la viabilidad comercial del sistema, sino que también estimulará la innovación y el crecimiento continuo del proyecto.

Anexos

Anexo 1: materiales utilizados

Teniendo en cuenta cómo va a ser la disposición final de los componentes en la PCB y como va a quedar cuando estén soldados, se debe hacer una revisión general de los componentes utilizados más relevantes, esa lista final de componentes se muestra a continuación:

Componente	Referencia	Nombre en PCB
Convertidor DC/DC Boost	PAM2421AECADJR	IC1
Regulador 3.3V	AZ1117CH2-3.3TRG1	IC2
Regulador de voltaje inverso	TC7662BCOA	IC3
Microcontrolador	ESP32-S2-SOLO-N4R2	IC4
Amplificador de instrumentación	INA129UA_2K5	IC5
Amplificador operacional	LM2904BIDGKR	IC6
Amplificador operacional	LM2904BIDGKR	IC7
Bobina 6.8 uH	TYS60456R8M-10	L1
Resistencia 40.2 K Ω	ERJ-PA3F4022V	R1
Resistencia 51 K Ω	ERJ-PA3J513V	R2
Resistencia 84.5 K Ω	ERJ-PA3F8452V	R3
Resistencia 51 K Ω	ERJ-PA3J513V	R4
Resistencia 10 K Ω	ERJ-PA3F1002V	R5
Resistencia 10 K Ω	ERJ-PA3F1002V	R6
Resistencia 10 K Ω	ERJ-PA3F1002V	R7
Resistencia 100 K Ω	ERJ-PA3J104V	R8
Resistencia 51 K Ω	ERJ-PA3J513V	R9
Resistencia 100 K Ω	ERJ-PA3J104V	R10
Resistencia 100 K Ω	ERJ-PA3J104V	R11
Resistencia 36 K Ω	ERJ-PA3F3602V	R12
Resistencia 120 K Ω	ERJ-PA3J124V	R13
Resistencia 33.2 K Ω	ERJ-PA3F3322V	R14
Condensador 10 uF	GRM188R61C106MAALJ	C1
Condensador 1 uF	CL10A105KP8NNNC	C2
Condensador 10 uF	GRM188R61C106MAALJ	C3
Condensador 10 nF	0603YD103KAT2A	C4
Condensador 47 pF	06033C470KAT2A	C5
Condensador 2.2 nF	885012206036	C6
Condensador 10 uF	GRM188R61C106MAALJ	C7
Condensador 22 uF	GRM188R60J226MEA0D	C8
Condensador 10 uF	GRM188R61C106MAALJ	C9
Condensador 10 uF pol	865080340001	C10
Condensador 10 uF pol	865080340001	C11
Condensador 22 uF	GRM188R60J226MEA0D	C12
Condensador 100 nF	C0603C104K8RAC	C13

Condensador 10 uF	GRM188R61C106MAALJ	C14
Diodo rectificador	SS34FA	D1, D2
Resistor Trimmer	67ZR10KLF	VR1, VR2
Bornera de conexión 5 puestos	TB003-500-P05BE	J3
Soporte de baterías	1055	J1

Al momento de escoger los componentes se hizo primera elección en el amplificador de instrumentación y en el microcontrolador. Para el amplificador, se escogió el INA129 debido a que era muy similar al conocido y antes trabajado AD620, el INA129 presenta la misma ecuación para el cálculo de la resistencia de ganancia R_G pero presentaba mejoras considerables en comparación con el AD620, como mejor rechazo en modo común con 120 dB, menor corriente de operación con 700 uA, mayor Slew rate con 4V/us y lo principal es su voltaje de offset con 50 uV.

Los amplificadores operacionales seleccionados fueron los LM2904, en parte debido a su similitud con los LF353, los cuales han demostrado un rendimiento confiable en trabajos anteriores. Optamos por los LM2904 debido a varias ventajas que ofrecen: un ancho de banda típico de 1.2 MHz, un rango de voltaje de alimentación más amplio que va desde ± 3 V a ± 36 V y un mejor Slew rate de 0.6 V/ μ s. Además, el LM2904 presenta una corriente de polarización de entrada baja, lo que lo hace ideal para aplicaciones de baja potencia y contribuye a prolongar la vida útil de la batería en dispositivos portátiles. Por último, su coste más económico lo convierte en una opción asequible para una variedad de aplicaciones generales.

El microcontrolador escogido fue uno de la familia ESP32, específicamente el ESP32-S2-SOLO. La principal ventaja de la familia ESP32 es su bajo consumo de potencia porque su alimentación nominal es de 3.3V con un rango de alimentación de 3 V hasta los 3.6 V. Permite conectividad Wifi y Bluetooth por lo que hay un ahorro al no tener que buscar un componente externo que permita esa misma funcionalidad. Por otro lado, permite protocolos de comunicación I2C, SPI, I2S y UART por lo que se pueden conectar sensores y demás elementos de manera eficiente en un solo controlador. Lo más importante de este microcontrolador es que como pertenece a la familia ESP32-S2 entonces su convertor Analógico-Digital es de 13 bits por lo que tiene mayor resolución y su voltaje de referencia es de 3.3 V llegando a un máximo de 3.6 V, lo que lo hace perfecto para el sistema de acondicionamiento de señal planteado y a su vez permite medir con mayor calidad la masa que pueda estar sobre la celda de carga.

Para escoger los amplificadores operacionales se hizo una minuciosa revisión en los voltajes de alimentación, así como la cantidad de corriente que podrían consumir, la cual debía ser lo más pequeña posible. Para el convertidor DC/DC que alimenta las celdas y los amplificadores, se buscó un componente que ya había sido utilizado en proyectos anteriores y cuyo uso no es complejo, PAM2421AECADJR, inclusive dentro de la hoja de datos del fabricante hay aplicaciones típicas con montajes predefinidos para un voltaje de salida de 12V con máximo 800 mA de corriente para voltajes de entrada entre 3.5 y 5.6V lo cual facilitó la búsqueda de otros componentes como resistencias y condensadores.

Para la selección de los elementos pasivos, como resistencias y condensadores, se consideraron dos factores principales. En primer lugar, se evaluó la potencia máxima que las resistencias podrían disipar. Dado que la corriente máxima estimada en el circuito de potencia no superaría los 800 mA, se optó por resistencias de $\frac{1}{4}$ de vatio, asegurando que no se vieran afectadas por la corriente total del circuito. Por otro lado, se analizó detenidamente el voltaje máximo que los condensadores podían soportar, tanto cerámicos como electrolíticos. Esta evaluación se realizó en función del esquemático y la ubicación de los condensadores en el circuito, asegurando que pudieran manejar el voltaje previsto y así evitar posibles cortocircuitos. En algunos casos, se aumentó la capacidad de voltaje de los condensadores según las necesidades del circuito, garantizando su correcto funcionamiento sin riesgo de daños.

El regulador de voltaje inverso TC7662BCOA es un convertidor de voltaje versátil que puede operar con una fuente de alimentación que va desde 1.5V hasta 15V, ofreciendo una eficiencia energética del 96% para minimizar las pérdidas de energía. Su diseño simplificado lo hace fácil de usar, ya que solo requiere dos componentes pasivos externos (capacitores) y elimina la necesidad de inductores, lo que reduce costos y tamaño. Además, su frecuencia de conmutación ajustable permite operar a 10 kHz o 35 kHz según la configuración requerida. Este dispositivo ofrece ventajas económicas al ser una opción asequible para aplicaciones generales, puede sustituir directamente dispositivos estándar de la industria como el ICL7660 y está ampliamente disponible en el mercado. Sus aplicaciones incluyen conversiones simples de voltaje, suministros de alimentación para sistemas RS232. Lo principal de este conversor es su uso en sistemas de adquisición de datos e instrumentación para generar tensiones negativas en aplicaciones de medición y control.

El regulador de voltaje a 3.3V AZ1117CH2-3.3TRG1 sobresale como una opción excepcional para la regulación de voltaje gracias a su baja caída de tensión, alta eficiencia energética, facilidad de uso y confiabilidad. Este regulador LDO supera a otras alternativas al ofrecer un funcionamiento con una mínima diferencia entre la tensión de entrada y la de salida, ideal para aplicaciones con fuentes de alimentación cercanas al voltaje deseado. Su elevada eficiencia de potencia (96%) reduce las pérdidas de energía, mientras que su diseño simple requiere solo dos componentes pasivos externos para su funcionamiento. Para mayor seguridad, cuenta con protección térmica contra altas temperaturas y precisión de salida de $\pm 1\%$ (excepto en la versión de 1.2V). Su amplia disponibilidad en el mercado lo convierte en una opción atractiva para diversos proyectos. El AZ1117CH2-3.3TRG1 se presenta como una solución superior para aplicaciones que demandan una regulación de voltaje confiable, eficiente y fácil de implementar.

El diodo SS34FA es un diodo rectificador de tipo Schottky que puede manejar hasta 40V de tensión inversa y soporta una corriente de hasta 3A, con una baja caída de voltaje de aproximadamente 0.5V que minimiza las pérdidas de energía. Sus características lo hacen ideal para circuitos alimentados por baterías, ya que la baja caída de voltaje mejora la eficiencia energética, una consideración crucial cuando se trabaja con fuentes de alimentación limitadas. Además, el SS34FA puede proteger el circuito contra la inversión de polaridad de la batería, y su encapsulado compacto facilita la integración en placas de circuito impreso. La rápida recuperación del diseño Schottky también es beneficiosa en aplicaciones

de conmutación, haciendo del SS34FA una excelente opción para la protección de circuitos alimentados por baterías.

Tabla de precios

Ya teniendo en cuenta las razones para el uso de los elementos que conforman el circuito, ahora se expone una tabla que registra la cantidad utilizada de cada material para realizar cuatro PCB's así como el precio por unidad y el precio total tanto en dólares (USD).

Referencia	Precio unidad	Cantidad	Precio total (USD)
PAM2421AECADJR	0.78	4	3.12
AZ1117CH2-3.3TRG1	0.35	4	1.40
TC7662BCOA	2.57	4	10.28
ESP32-S2-SOLO-N4R2	2.30	4	9.20
INA129UA_2K5	7.94	4	31.76
LM2904BIDGKR	0.40	8	3.20
TYS60456R8M-10	0.46	4	1.84
ERJ-PA3F4022V	0.14	4	0.56
ERJ-PA3J513V	0.038	12	0.456
ERJ-PA3F8452V	0.15	4	0.60
ERJ-PA3F1002V	0.046	12	0.552
ERJ-PA3J104V	0.038	12	0.456
ERJ-PA3F3602V	0.14	4	0.56
ERJ-PA3J124V	0.10	4	0.40
ERJ-PA3F3322V	0.14	4	0.56
GRM188R61C106MAALJ	0.149	20	2.98
CL10A105KP8NNNC	0.10	4	0.40
0603YD103KAT2A	0.10	4	0.40
06033C470KAT2A	0.19	4	0.76
885012206036	0.10	4	0.40
GRM188R61C106MAALJ	0.149	20	2.98
GRM188R60J226MEA0D	0.15	8	1.20
865080340001	0.18	8	1.44
C0603C104K8RAC	0.10	4	0.40
SS34FA	0.45	8	3.60
67ZR10KLF	1.59	8	12.72
TB003-500-P05BE	0.88	4	3.52
1055	6.74	4	26.96
PRECIO FINAL	-	-	122.704

Al final, para el diseño del sistema con las cuatro PCB's necesarias el costo de los materiales fue de 122.704 dólares.

Anexo 2: Pruebas de funcionamiento en la presentación final

El día de la presentación final ante el director del proyecto, se realizó una prueba completa del sistema utilizando todos los sensores. El principal objetivo era analizar el voltaje medido por el sistema para interpretar correctamente la masa del objeto sensado. Para validar esto, se utilizaron seis pesas del laboratorio de Automatización Industrial junto con una de las cuatro celdas de carga. Cada pesa tiene una masa aproximada de 20 libras, sumando un total de 120 libras (54.4311 kg).

Bajo condiciones normales, la ecuación que modela el comportamiento del voltaje convierte esta masa en el voltaje que el microcontrolador debe medir:

$$V_{out} = 0.00204x - 0.8564175 [V]$$
$$V_{out} = 0.00204(54.4311) - 0.8564175 [V]$$
$$V_{out} = -0.7453 V$$

El microcontrolador mediría un voltaje negativo, interpretándolo como cero voltios. Para evitar daños, se ajustó el potenciómetro para que el nivel DC fuera cero voltios, modificando la ecuación de salida:

$$V_{out} = 0.00204x$$
$$V_{out} = 0.00204(54.4311)$$
$$V_{out} = 0.1110 V$$

Este voltaje es medido correctamente por el microcontrolador. Sin embargo, no se logró corregir la ecuación programada que convertía el voltaje en masa. La ecuación original para interpretar la masa es:

$$Masa = \frac{Voltaje + 0.8564175}{0.00204}$$
$$Masa = \frac{0.1110 + 0.8564175}{0.00204}$$
$$Masa = 474,224$$

Este valor no es cercano al real debido a un nivel de referencia de 419.81 kg, cuando no hay ningún voltaje sobre la celda. Por lo tanto, se debe restar este nivel de referencia:

$$Masa = 474.224 Kg - 419.81 Kg$$
$$Masa = 54,41 Kg$$

Este resultado muestra un ligero desbalance y aunque la masa medida no es exacta, está muy cercana. Se requieren ajustes en el código para mejorar la precisión. Durante pruebas

adicionales, dos voluntarios se subieron sobre las pesas, lo que desestabilizó las mediciones debido a la falta de estabilidad de la celda de carga.

Además, el sensor de distancia presentaba algunas fallas, mostrando siempre distancias mayores debido a una referencia de aproximadamente 3 cm más en la medida. Esto se puede corregir mediante software, restando esta referencia del valor medido para obtener datos más precisos.

En conclusión, las pruebas realizadas durante la presentación final demostraron que el sistema es funcional, pero necesita ajustes para mejorar su precisión y estabilidad. La medición de masa mostró que el sistema puede obtener valores cercanos a los reales, aunque se requiere una calibración adicional en el código para eliminar desbalances y garantizar mediciones exactas. Asimismo, la inestabilidad de las celdas de carga bajo cargas variables debe ser abordada para evitar desajustes en las mediciones.

Por otro lado, las fallas detectadas en el sensor de distancia debido a una referencia incorrecta también pueden ser corregidas mediante ajustes en el software. La implementación de estas mejoras permitirá que el sistema funcione de manera más fiable y precisa. Debido a las pocas pruebas que se realizaron, se concluye de buena manera que la mayor parte de las correcciones en las medidas pueden lograrse mediante software y no tanto en el hardware, cumpliendo así con la idea principal en el diseño del sistema. El próximo paso será realizar las correcciones necesarias en el software y hardware, asegurando que el sistema esté calibrado correctamente y todas las mediciones sean exactas.

Anexo 3: Análisis del Comportamiento del Voltaje de las Baterías en Pleno Funcionamiento

El sistema desarrollado para medir el peso y estimar el volumen de residuos utiliza baterías CR123A como fuente de alimentación. Estas baterías son conocidas por su alta densidad de energía y capacidad de 3V, lo que las hace adecuadas para aplicaciones portátiles y de baja energía. Sin embargo, es crucial analizar el comportamiento del voltaje de las baterías cuando el sistema entra en pleno funcionamiento sin parar, incluso teniendo en cuenta que el sistema ha sido programado para mantener un modo "Deep Sleep" para maximizar la eficiencia energética.

Cuando el sistema está en pleno funcionamiento, varios componentes, incluidos los amplificadores operacionales, los sensores y la comunicación I2C, estarán en uso continuo. El consumo energético de estos componentes puede variar, pero generalmente es mayor que en el modo "Deep Sleep". Los amplificadores operacionales, especialmente aquellos que operan a $\pm 12V$, pueden ser particularmente demandantes en términos de energía. Además, la pantalla OLED, si es utilizada continuamente para mostrar datos, también contribuirá al consumo energético. El modo "Deep Sleep" ha sido implementado para reducir el consumo energético del microcontrolador y otros componentes cuando no están en uso activo. Este enfoque es crucial para extender la vida útil de las baterías, minimizando el consumo energético cuando el sistema no está realizando tareas esenciales.

Durante el funcionamiento continuo del sistema, incluso con el modo "Deep Sleep" activo, el voltaje de las baterías CR123A experimentará una disminución gradual debido al consumo constante de energía. Inicialmente, las baterías mantendrán un voltaje estable de 3V cada una, pero a medida que se descarguen, el voltaje comenzará a decrecer. Este decremento no es lineal y puede acelerarse cuando el voltaje cae por debajo de ciertos umbrales, afectando la estabilidad y el rendimiento del sistema.

En condiciones de pleno funcionamiento sin interrupciones, es posible observar una reducción en la eficiencia energética del sistema. Esto se debe a que, aunque el modo "Deep Sleep" reduce el consumo en momentos de inactividad, los períodos de actividad continua pueden agotar las baterías más rápidamente de lo esperado. El sistema monitorea el voltaje de las baterías constantemente para predecir cuándo se alcanzarán niveles críticos y planificar recargas o reemplazos de manera oportuna.

Para mitigar los efectos del agotamiento de las baterías y garantizar un funcionamiento prolongado del sistema, se deben considerar varias estrategias. Una opción es optimizar aún más el código del sistema para reducir los tiempos de actividad y maximizar los períodos en "Deep Sleep". Además, la implementación de técnicas de gestión de energía más avanzadas, como el ajuste dinámico de la frecuencia del microcontrolador y la reducción de la luminosidad de la pantalla OLED, puede contribuir a una mayor eficiencia.

Otra consideración es el uso de baterías recargables de mayor capacidad o la integración de una fuente de energía suplementaria, como paneles solares, para extender la vida útil de las baterías CR123A. Esto permitiría al sistema funcionar por períodos más largos sin necesidad de intervención manual para el reemplazo de baterías.

En pleno funcionamiento continuo, el voltaje de las baterías CR123A disminuirá gradualmente, afectando potencialmente la estabilidad y el rendimiento del sistema. El modo "Deep Sleep" ayuda a mitigar este efecto, pero no elimina completamente el consumo energético durante los períodos de actividad. Para asegurar un funcionamiento prolongado y fiable del sistema, es esencial optimizar aún más la gestión de energía y considerar fuentes de energía alternativas o baterías de mayor capacidad. Con estas medidas, se puede mantener la eficiencia del sistema y prolongar la vida útil de las baterías, asegurando un rendimiento consistente y fiable en entornos desafiantes.

Anexo 4: Análisis del Comportamiento del Sistema ante Entornos con Vibraciones

El sistema desarrollado para medir el peso y estimar el volumen de residuos está diseñado para ser utilizado en entornos diversos, incluyendo áreas de construcción y canteras. Estos entornos se caracterizan por la presencia constante de vibraciones causadas por el paso de maquinaria pesada y otras actividades intensivas. Este análisis tiene como objetivo determinar el impacto que las vibraciones pueden tener en el funcionamiento y las mediciones del sistema, con un enfoque particular en las celdas de carga, que son los sensores principales utilizados para las mediciones de peso.

Las celdas de carga son dispositivos altamente sensibles que convierten la fuerza aplicada en una señal eléctrica proporcional. En condiciones ideales, estas señales son precisas y permiten realizar mediciones confiables. Sin embargo, en un entorno con vibraciones constantes, varios efectos adversos pueden afectar la precisión de estas mediciones. Por ejemplo, las vibraciones pueden inducir ruido eléctrico y señales espurias en los cables y conexiones de las celdas de carga. Este ruido puede superponerse a la señal real de la celda de carga, causando fluctuaciones y mediciones inexactas. Además, las vibraciones pueden causar desalineaciones físicas en la celda de carga y en los componentes asociados, lo que puede alterar la distribución de las fuerzas en la celda, afectando su respuesta y precisión. Las mediciones resultantes pueden ser erráticas y no reflejar el peso real del residuo.

Otro problema potencial es que las celdas de carga y otros componentes del sistema pueden entrar en resonancia con las frecuencias de vibración del entorno. La resonancia amplifica las vibraciones, aumentando el riesgo de daño físico y degradación de la señal. La falta de amortiguación adecuada puede resultar en mediciones inestables y fluctuantes. Además, el protocolo de comunicación I2C, utilizado para la transferencia de datos entre sensores y la pantalla, puede ser susceptible a las interferencias generadas por las vibraciones. Esto puede ocasionar pérdidas de datos o errores en la comunicación, afectando la integridad de las mediciones y la visualización de los resultados.

Para mitigar estos efectos y mejorar la fiabilidad del sistema en entornos con vibraciones, se deben implementar varias soluciones. En primer lugar, es fundamental desarrollar filtros digitales y algoritmos de procesamiento de señales que puedan mitigar el ruido y estabilizar las lecturas. Estos filtros pueden ayudar a distinguir entre las señales reales de peso y las fluctuaciones causadas por las vibraciones, proporcionando mediciones más precisas y confiables.

Además, se debe diseñar un sistema de montaje que minimice las vibraciones transmitidas a las celdas de carga. Utilizar materiales amortiguadores y soportes antivibración puede reducir significativamente el impacto de las vibraciones en las celdas de carga, manteniendo la precisión de las mediciones. También es importante asegurar una correcta gestión de las interferencias electromagnéticas (EMI) y utilizar cables apantallados para la comunicación I2C. Esto ayudará a proteger las señales de comunicación de los efectos de las vibraciones, asegurando la integridad de los datos transmitidos entre los sensores y la pantalla.

Finalmente, implementar un programa de mantenimiento preventivo que incluya la revisión y calibración periódica de las celdas de carga y otros componentes críticos puede ayudar a detectar y corregir problemas antes de que afecten significativamente el rendimiento del sistema. Con estas medidas, se puede mejorar la robustez y fiabilidad del sistema en condiciones de vibración, asegurando mediciones precisas y consistentes en entornos desafiantes.

Anexo 5: Justificación del Uso de Voltajes de $\pm 12V$ en un Sistema Alimentado por Baterías

En el desarrollo de este proyecto, se optó por utilizar baterías como fuente de alimentación principal debido a su portabilidad y facilidad de uso en diversas ubicaciones. Sin embargo, aunque las baterías proporcionan una tensión continua (DC) limitada, se decidió emplear un sistema de alimentación dual con voltajes de +12V y -12V para satisfacer los requisitos operativos de ciertos componentes del sistema, especialmente los amplificadores operacionales y la celda de carga.

Los amplificadores operacionales, que son componentes esenciales para el acondicionamiento de la señal en este proyecto, a menudo requieren una alimentación dual para funcionar correctamente. La razón principal es que muchos de estos amplificadores operacionales necesitan una tensión tanto positiva como negativa para manejar señales de entrada que oscilan alrededor de cero voltios (señales de AC). Esto es crucial para obtener una amplificación precisa y lineal de las señales, evitando distorsiones que podrían afectar la calidad y exactitud de las mediciones.

Además, la celda de carga, utilizada como sensor principal para medir el peso, también opera de manera óptima con una alimentación de +12V. La alimentación dual de $\pm 12V$ permite que los amplificadores operacionales dentro del circuito de acondicionamiento de la señal trabajen eficientemente, proporcionando una mayor flexibilidad en el ajuste de la ganancia y mejorando la precisión de las mediciones.

Para implementar esta configuración de voltajes duales en un sistema alimentado por baterías, se utilizaron convertidores DC-DC. Estos dispositivos convierten la tensión continua proporcionada por las baterías (generalmente 3V o 6V de las baterías CR123A utilizadas en este proyecto) a los niveles de voltaje requeridos de $\pm 12V$. Los convertidores DC-DC son eficientes y permiten generar los voltajes necesarios sin comprometer la portabilidad y autonomía del sistema.

En resumen, aunque el sistema principal utiliza baterías como fuente de alimentación, el uso de voltajes de $\pm 12V$ es indispensable para garantizar el correcto funcionamiento de los amplificadores operacionales y la celda de carga. La implementación de convertidores DC-DC permite obtener estos voltajes a partir de la tensión continua de las baterías, asegurando una operación precisa y eficiente del sistema en su totalidad.

Anexo 6: Códigos Empleados en la Programación de las Tarjetas

Para la programación de cada módulo, se utilizó el IDE de Arduino por su facilidad de uso y su capacidad para ofrecer una mejor comprensión del código. Este entorno también proporciona acceso a librerías específicas, que resultaron cruciales para la integración de sensores y el uso

eficiente de la pantalla OLED, todos conectados mediante el protocolo de comunicaciones I2C.

El código, escrito en lenguaje C/C++, puede mejorarse aún más para habilitar la conexión WiFi con un nodo receptor y permitir el envío de datos desde el módulo a dicho nodo cada vez que el microcontrolador sale del modo Deep Sleep y toma muestras de distancia, masa y voltaje de la batería.

Para facilitar el acceso y la colaboración, el código se ha subido a un repositorio en GitHub, permitiendo que terceros puedan revisar, modificar y mejorar el proyecto. El enlace del repositorio se agrega a continuación.

https://github.com/SergioMarin23/Archivos_ProyectoDirigido.git.

Anexo 7: Diseño de PCB's de cada Módulo

Tal y como se mencionó en la sección de diseño de la PCB, se utilizó el software Altium Designer para el diseño de cada módulo. La elección de este software fue impulsada por la disponibilidad de licencias activas proporcionadas por la universidad a los estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica. Además, ya se tenía experiencia previa con el software gracias a trabajos realizados en distintas asignaturas.

La PCB se diseñó a dos caras por los siguientes motivos:

- Mayor densidad de componentes y diseño compacto.
- Mejores opciones de ruta.
- Integridad de señal mejorada.
- Conexión a tierra y distribución de energía mejorada.

El diseño detallado de la PCB se ha publicado en un repositorio de GitHub para que pueda ser revisado y utilizado por terceros de manera eficaz. El enlace se encuentra a continuación.

https://github.com/SergioMarin23/Archivos_ProyectoDirigido.git.

Referencias

- [1] Iacovidou, E., Purnell, P., & Lim, M. K. (2018). The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? *Journal of Environmental Management*, 216, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.093>.
- [2] Colaboradores de los proyectos Wikimedia. (2004, 7 de septiembre). *Amplificador de instrumentación - Wikipedia, la enciclopedia libre*. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_de_instrumentaci3n.
- [3] Drake Moyano, J. M. (2005). *El amplificador de instrumentaci3n*. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
- [4] PCB de doble cara: Una gu3a detallada para principiantes. (s.f.). Tecnología: Su socio de servicios de fabricaci3n electr3nica de confianza. <https://www.mokotechnology.com/es/double-sided-pcbs-a-detailed-guide/>.
- [5] Rodríguez, P. (2016, 12 de abril). *¡¡El error ABSOLUTO y el error RELATIVO - con VÍDEO [FÁCIL!!]*. unprofesor.com. <https://www.unprofesor.com/matematicas/que-es-el-error-absoluto-y-el-error-relativo-1176.html>.
- [6] Colombia genera 12 millones de toneladas de basura al a3o. (s.f.). Portafolio.co. <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-genera-12-millones-de-toneladas-de-basura-al-ano-565581>.
- [7] ¿Qué es IoT? - Explicaci3n del Internet de las cosas - AWS. (s.f.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>.
- [8] *Dispositivos (I) Internet de las cosas (IoT): Capitulo 14 | Gu3a de Industria 4.0*. (s.f.). Tecnología para los negocios. <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-14-dispositivos-i-internet-de-las-cosas-iot/#:~:text=Un%20dispositivo%20IoT%20consiste%20en,de%20servicios%20alrededor%20del%20mismo>.
- [9] “Internet de las cosas en la construcci3n - MOKOSmart #1 Soluci3n de dispositivo inteligente en China”. MOKOSmart #1 Soluci3n de dispositivo inteligente en China. Accedido el 29 de abril de 2024. [En l3nea]. Disponible: <https://www.mokosmart.com/es/iot-in-construction/#:~:text=Los%20dispositivos%20IoT%20ayudan%20a,y%20r3pida%20de%20los%20activos..>
- [10] Accedido el 29 de abril de 2024. [En l3nea]. Disponible: <https://www.digikey.com.mx/es/articles/a-guide-to-selecting-and-using-iot-and-iiot-power-sources>.
- [11] Accedido el 29 de abril de 2024. [En l3nea]. Disponible: <https://www.digikey.com/es/articles/powering-the-internet-of-things-from-ambient-sources>.

[12] “Uso de baterías Nichicon SLB en aplicaciones IoT”. Elektronische Teile. Vertriebshändler und Onlineshop - Transfer Multisort Elektronik. Accedido el 30 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/45795/uso-de-baterias-nichicon-slb-en-aplicaciones-iot/>.

[13] “Optimización de la vida útil de la batería en dispositivos IoT gracias a una sonda de potencia multicanal”. Branchenführende Technologiekompetenz | Rohde & Schwarz. Accedido el 30 de abril de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/optimizaci-n-de-la-vida-til-de-la-bater-a-en-dispositivos-iot-gracias-a-una-sonda-de-potencia-multicanal-nota-de-aplicacion_56280-497822.html.

[14] “Tendencias de diseño: baterías para Internet de las Cosas (IoT)”. Interempresas. Accedido el 1 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: [https://www.interempresas.net/Electronica/Articulos/171251-Tendencias-de-diseno-baterias-para-Internet-de-las-Cosas-\(IoT\).html](https://www.interempresas.net/Electronica/Articulos/171251-Tendencias-de-diseno-baterias-para-Internet-de-las-Cosas-(IoT).html).

[15] Colaboradores de los proyectos Wikimedia. “Pila alcalina - Wikipedia, la enciclopedia libre”. Wikipedia, la enciclopedia libre. Accedido el 1 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_alcalina.

[16] ““Descubre todos los secretos de la batería CR123 en un solo click!””. Sovi. Accedido el 28 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.sovi.es/equivalente-voltaje-tamano-usos-y-vida-util-de-la-bateria-cr123-preguntas-frecuentes/>.

[17] “Las baterías de ion de litio, fundamentales para el almacenamiento de energía”. Iberdrola. Accedido el 28 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.iberdrola.com/innovacion/baterias-ion-litio>.

[18] L. Zhao et al., “Engineering of sodium-ion batteries: Opportunities and challenges”, Engineering, mayo de 2022. Accedido el 4 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.032>.

[19] S. Tang, D. R. Shelden, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi y X. Gao, “A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends”, Automat. Construction, vol. 101, pp. 127–139, mayo de 2019. Accedido el 4 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020>.

[20] “Pancake Load Cells DYLF-102 - CALT Sensor”. CALT Sensor. Accedido el 29 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://caltensor.com/product/pancake-load-cells-dylyf-102/>.

[21] Incibe, Seguridad en la instalación y uso de dispositivos IoT: Una guía de aproximación para el empresario. 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia-de-seguridad-iot.pdf>.

[22] “Comparación abs vs policarbonato: propiedades y aplicaciones | POLISANTAFE”. POLISANTAFE. Accedido el 29 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://polisantafe.com.ar/material-abs-o-policarbonato/>.

[23] “La importancia de la separación en la fuente para la gestión de residuos sólidos”. Vertedero.es. Accedido el 30 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://vertedero.es/blog/la-importancia-de-la-separacion-en-la-fuente-para-la-gestion-de-residuos-solidos>.