



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de un sistema de monitoreo de aguas residuales

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Adrian Zárate Bruno

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Enrique Ramón Gómez Rosas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**
(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DE AGUAS RESIDUALES que presenté para obtener el título de INGENIERO ELÉCTRICO ELÉCTRONICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ADRIAN ZARATE BRUNO
Número de cuenta: 318250281

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de una estación modular de instrumentación, conformada por acondicionadores de señal independientes, diseñada para medir de manera periódica y precisa las variables de conductividad, pH, nivel y temperatura en lagunas de tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos demuestran el correcto funcionamiento de cada acondicionador, corroborando tanto la validez de las aplicaciones desarrolladas como la programación implementada en los dispositivos.

El diseño modular de la estación constituye una solución tecnológica accesible y adaptable a las necesidades específicas del Instituto de Ingeniería, lo que permite reducir costos de instalación y requerimientos de mantenimiento, además de facilitar la futura expansión del sistema.

Abstract

This work presents the development of a modular instrumentation station, composed of independent signal conditioners, designed to periodically and accurately measure conductivity, pH, level, and temperature variables in wastewater treatment lagoons.

The results obtained demonstrate the correct operation of each conditioner, confirming both the validity of the developed applications and the programming implemented in the devices.

The modular design of the station constitutes an accessible technological solution, adaptable to the specific needs of each study site, allowing for reduced installation costs and maintenance requirements, while facilitating future system expansion.

Agradecimientos

A mis padres:

Adriana Bruno Méndez y Manuel Antonio Zárate Ruiz.

En especial a mi madre que me ha apoyado incondicionalmente durante todas las etapas de mi vida, y con quién he logrado superar momentos difíciles.

A mi abuelita:

Graciela MéndezLópez.

Por todo el amor, cuidados y consejos que siempre me brindó.

A mis familiares:

Por todo el apoyo y confianza que han depositado en mí.

A mis amigos:

Por el apoyo y los momentos alegres que me brindaron, que amenizaron mi paso por la facultad.

A mi director de tesis:

Ing. Enrique Ramón Gómez Rosas.

Por brindarme su apoyo y enseñanzas. Y por ponerme desafíos que complementaron y ampliaron mis habilidades como ingeniero.

Al Instituto de Ingeniería:

Por permitirme hacer uso de las instalaciones y equipos y por brindarme apoyo económico con el que pude enforcarme por completo a este proyecto.

Índice

1.	Introducción.....	7
1.1	Antecedentes.....	7
1.2	Planteamiento del problema	8
1.3	Objetivo General.....	9
1.4	Objetivos Específicos	9
2.	Marco teórico.....	10
2.1	Sistemas embebidos.....	10
2.2	Aplicaciones del proyecto	15
2.3	Conductividad eléctrica	16
2.4	Potencial de hidrógeno (pH).....	17
2.5	Nivel	17
2.6	Temperatura.....	19
3.	Diseño de la estación modular.....	20
3.1	Circuito de alimentación.....	21
3.2	Circuito de comunicaciones.....	22
3.3	Conexiones de programación	24
4	Módulo de Conductividad	25
4.1	Principio de funcionamiento.....	25
4.2	Diseño del circuito.....	29
4.3	Programación.....	36
4.4	Desarrollo de la aplicación	47
4.5	Pruebas de funcionamiento.....	54
5	Módulo de temperatura.....	63
5.1	Principio de funcionamiento.....	63
5.2	Diseño del circuito.....	64
5.3	Programación.....	65
5.4	Desarrollo de la aplicación	69
5.5	Pruebas de funcionamiento.....	73
6	Módulo de pH.....	75
6.1	Principio de funcionamiento.....	75
6.2	Diseño del circuito.....	75
6.3	Programación.....	79

6.4	Desarrollo de la aplicación	86
6.5	Pruebas de funcionamiento.....	91
7	Módulo de Nivel.....	93
7.1	Principio de funcionamiento.....	93
7.2	Diseño del circuito.....	96
7.3	Programación.....	98
7.4	Desarrollo de la aplicación	105
7.5	Pruebas de funcionamiento.....	109
8	Estación Modular.....	111
8.1	Consideraciones para la instalación en campo	114
	Trabajo futuro	116
	Conclusiones.....	117
	Referencias	118

1. Introducción

1.1 Antecedentes

En el campo de la instrumentación para el monitoreo de calidad del agua, se han desarrollado diversos dispositivos multiparamétricos capaces de medir simultáneamente variables como pH, conductividad, temperatura y sólidos disueltos. Estos equipos han sido utilizados en aplicaciones de laboratorio, acuicultura y control de agua potable, aunque solo algunos modelos cuentan con las características necesarias para operar de manera confiable en ambientes más agresivos como las aguas residuales.

La revisión de dispositivos multiparamétricos como el “Oakton PCTSTestr 50”, el “HM Digital COM-360” y el “Extech EC500” muestra que, si bien ofrecen accesibilidad y simplicidad en la medición de parámetros básicos, su diseño está orientado a aplicaciones de laboratorio, acuicultura y agua potable. Estos equipos permiten calibraciones sencillas y rápidas, pero carecen de sistemas de autolimpieza, materiales anticorrosivos avanzados y opciones de comunicación inalámbrica, lo que limita su uso en ambientes hostiles como aguas residuales.

En contraste, equipos profesionales como la serie YSI EXO sí están diseñados para operar en condiciones extremas, incorporando sistemas de limpieza automática, protocolos industriales de comunicación y módulos de telemetría inalámbrica. Sin embargo, su costo elevado, que puede superar los \$30,000 MXN, restringe su accesibilidad en entornos académicos.

Otro punto importante es la calibración. Muchos dispositivos comerciales requieren procesos de calibración que solo pueden ser realizados por personal autorizado de la empresa fabricante, lo que implica costos adicionales y dependencia de servicios externos. En cambio, un sistema modular permite que la calibración se realice de manera independiente en cada sensor, otorgando mayor control al usuario y reduciendo gastos asociados. Esta independencia es particularmente valiosa en entornos académicos, donde la flexibilidad y la capacidad de ajuste son esenciales para la investigación.

Asimismo, la tendencia actual indica que los nuevos equipos comerciales que ofrecen la creación de historiales de mediciones lo hacen mediante plataformas en la nube administradas por la propia empresa. El acceso a estos datos suele estar condicionado a la contratación de una suscripción, lo que incrementa los costos operativos y genera dependencia tecnológica. En contraste, el desarrollo de una estación modular con un sistema propio de almacenamiento y gestión de datos permite independizarse de servicios externos, garantizando que la información se mantenga bajo control institucional y reduciendo significativamente los gastos asociados a licencias o suscripciones.

Un aspecto adicional que debe considerarse es la vulnerabilidad al vandalismo en instalaciones como lagunas de tratamiento. Los equipos comerciales de alto costo representan una inversión significativa, por lo que su pérdida o daño implica un impacto económico considerable. En este sentido, la ventaja de un sistema modular de bajo costo es que puede instalarse en campo sin que el riesgo de vandalismo represente una limitación crítica.

En conjunto, estas consideraciones refuerzan las ventajas de la estación modular apilable:

- Bajo costo, que facilita su reposición en caso de vandalismo o daño.
- Herramienta práctica y funcional para el Instituto de Ingeniería, adaptable a diferentes proyectos de investigación.
- Independencia tecnológica, al contar con un sistema propio de calibración y almacenamiento de datos.
- Viabilidad académica, al permitir estudiar la factibilidad de construir dispositivos de estas características y fomentar la innovación en instrumentación.

Aunque no alcanza la certificación ni la robustez de los equipos industriales, el proyecto modular ofrece una alternativa estratégica que combina flexibilidad, economía y autonomía, convirtiéndose en una plataforma idónea para investigación aplicada y formación académica en el área de ingeniería ambiental.

1.2 Planteamiento del problema

Uno de los insumos básicos para la actividad humana es el agua, esencial en prácticamente cualquier proceso productivo, desde la agricultura hasta la industria y la generación de energía, entre otros. Sin embargo, la disponibilidad de agua dulce a nivel mundial es sumamente limitada, ya que aproximadamente el 97.5 % corresponde a agua salada y únicamente el 2.5 % es agua dulce. Además, cerca del 70% de la reserva de agua dulce está congelada, lo que restringe su acceso para el consumo humano (CONAGUA, 2024).

Ante este panorama de escasez, la creciente demanda de agua potable y la urgencia de retornar el recurso usado en forma respetuosa al medio ambiente han impulsado el desarrollo de múltiples métodos de tratamiento de aguas residuales, que incluyen procesos físicos, mecánicos, químicos, biológicos o incluso combinaciones. Entre estos, los procesos biológicos se han consolidado como los más utilizados en países en vías de desarrollo, debido a su bajo costo, simplicidad operativa y aprovechamiento de la energía solar y de la acción de microorganismos.

Las lagunas de estabilización representan un ejemplo de este enfoque, en estos sistemas, se facilita la interacción de diversas biomasas como algas, bacterias y protozoarios dentro de cuerpos donde el agua residual permanece retenido durante un periodo determinado. Así, la depuración se logra mediante procesos naturales de purificación biológica, sin requerir energía externa adicional más allá de la radiación solar. En comparación con los métodos químicos, este enfoque ofrece ventajas significativas: bajo consumo energético, ausencia de reactivos industriales costosos, operativos reducidos y un impacto ambiental positivo al favorecer la captura de dióxido de carbono, lo que mitiga el cambio climático.

Para maximizar estos procesos biológicos, es indispensable contar con un monitoreo continuo de las variables fisicoquímicas que determinan el desempeño de las lagunas. Entre las más relevantes se encuentran la conductividad eléctrica, el pH, la temperatura y el nivel de agua, parámetros que permiten evaluar las condiciones del medio y tomar decisiones oportunas para mantener la estabilidad de los procesos biológicos.

Este trabajo surge como parte de un proyecto interdisciplinario del Instituto de Ingeniería, donde se pretende integrar a sus distintas áreas para crear un proyecto de desarrollo tecnológico.

Como parte del área de electrónica, mi trabajo se limita únicamente al diseño, construcción, programación, creación de aplicaciones y puesta en marcha de los dispositivos encargados de realizar las mediciones. La tarea de interpretar la información arrojada por los dispositivos desarrollados corresponde a otra área que es afín a las ingenierías químico-biológicas.

1.3 Objetivo General

Desarrollar una estación modular de instrumentación, integrada por acondicionadores de señal, capaz de medir de manera periódica y precisa las variables de conductividad, pH, nivel y temperatura en lagunas de tratamiento de aguas residuales.

1.4 Objetivos Específicos

- Diseñar acondicionadores individuales para cada variable físico-química, asegurando precisión y confiabilidad en la adquisición de datos.
- Implementar aplicaciones en LabVIEW para la lectura, configuración y calibración de cada acondicionador.
- Desarrollar una aplicación general en LabVIEW que permita la adquisición conjunta de las cuatro variables, mostrando las lecturas en formato numérico y gráfico.
- Generar un sistema de almacenamiento de datos estructurado por fecha, que facilite el análisis detallado por parte de expertos en procesos biológicos.

2. Marco teórico

Para desarrollar los acondicionadores propuestos en esta tesis es fundamental establecer una base conceptual que abarque tanto los fundamentos de la electrónica aplicada en cada acondicionador, así como los principios de las variables físico-químicas que se pretenden medir mediante los módulos diseñados.

En primer lugar, es necesario comprender que cada acondicionador constituye en realidad un sistema embebido capaz de funcionar de manera independiente; sin embargo, han sido concebidos con un diseño modular que permite su integración en una estación apilable, adaptable a las necesidades específicas de cada aplicación.

2.1 Sistemas embebidos

Son sistemas que realizan una acción específica para que un dispositivo o aparato tecnológico funcione. Por lo general, un sistema embebido contiene una microcomputadora que funciona con base en datos que obtiene a través de sensores, los procesa y entrega un resultado (Gallegos, 2023).

Principalmente tienen cuatro componentes:

1. Microcomputadora: es el dispositivo físico encargado de procesar la información proveniente del entorno, con el fin de generar la salida específica.
2. Sensores: son elementos físicos que perciben estímulos del medio y transmiten esos datos a la microcomputadora dentro del sistema embebido.
3. Actuadores: son los componentes que materializan o ejecutan la respuesta generada por el sistema embebido.
4. Firmware: corresponde al programa que hace posible la operación coordinada de todos los componentes de hardware mencionados.(Gallegos, 2023)

- **Microcontroladores y microprocesadores:**

La microcomputadora puede ser un microcontrolador o un microprocesador, la diferencia fundamental entre estas dos unidades radica en que los microcontroladores integran en un solo chip todos los elementos necesarios de una microcomputadora. Esto les permite operar sin requerir periféricos externos adicionales ni sistemas operativos complejos.

En contraste, los microprocesadores sí dependen de componentes externos para funcionar. Ambos circuitos incluyen una CPU; sin embargo, los microcontroladores también incorporan memoria, módulos de entrada/salida y diversos periféricos integrados (Schneider, 2025).

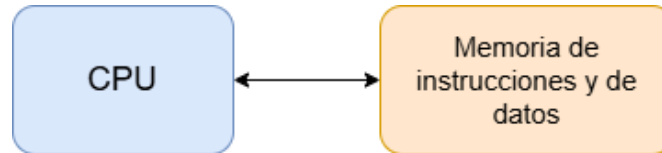
- **Tipos de arquitecturas:**

Existen dos modelos de organización interna en los sistemas de cómputo, los que se denominan arquitecturas y se refieren a la forma en la que están dispuestos y conectados sus componentes principales (unidad de procesamiento, memoria, buses, periféricos) y cómo interactúan entre sí para ejecutar instrucciones.

- *Arquitectura Von Neumann:*

Propuesta en 1945 por John Von Neumann, este modelo establece una organización lógica en la cual tanto las instrucciones del programa como los datos se almacenan en una misma memoria principal y son accedidos a través de un bus compartido.

Ilustración 1: Arquitectura Von Neumann



En este esquema, la Unidad Central de Procesamiento (CPU) se compone de dos bloques esenciales: la Unidad de Control, responsable de interpretar las instrucciones y coordinar el flujo de información, y la Unidad Aritmético-Lógica (ALU), encargada de ejecutar operaciones matemáticas y lógicas. El procesador interactúa con la memoria mediante un conjunto de registros internos, que permiten almacenar temporalmente datos e instrucciones durante el ciclo de ejecución (Von-Neumann vs Arquitectura de Harvard, 2020).

Esta arquitectura cuenta con múltiples ventajas como:

- Simplicidad estructural: La utilización de una memoria única para almacenar tanto instrucciones como datos reduce la complejidad del hardware y facilita la implementación del sistema.
- Flexibilidad operativa: El hecho de que datos e instrucciones compartan el mismo espacio de memoria permite un manejo versátil de la información, posibilitando que programas puedan modificarse a sí mismos o que datos sean interpretados como código.

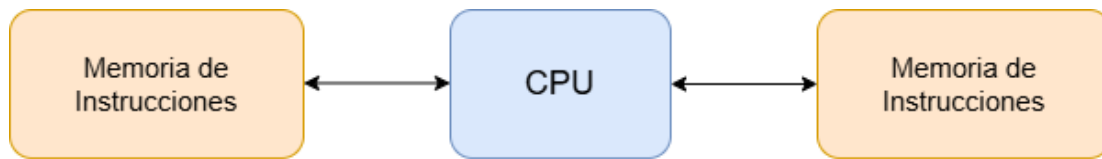
Sin embargo, también existen desventajas que han dado paso a la creación de nuevas arquitecturas, estas desventajas son:

- Cuello de botella de Von Neumann: El uso de un único bus para acceder a instrucciones y datos limita el rendimiento, ya que el procesador no puede realizar ambas operaciones de manera simultánea.
- Restricciones de velocidad: La ejecución secuencial del ciclo de instrucción limita la capacidad de procesamiento paralelo.

- *Arquitectura Harvard:*

La arquitectura Harvard constituye un modelo alternativo al esquema Von Neumann, caracterizado por la separación física y lógica entre la memoria de instrucciones y la memoria de datos. Este diseño permite que el procesador acceda de manera simultánea a ambos espacios de memoria mediante buses independientes, lo cual incrementa significativamente el rendimiento en la ejecución de programas.

Ilustración 2: Arquitectura Harvard



En este modelo, la Unidad Central de Procesamiento (CPU) dispone de dos caminos diferenciados: uno destinado a la lectura de instrucciones y otro orientado al acceso de datos. De esta manera, el ciclo de instrucción puede optimizarse, ya que mientras se decodifica una instrucción, el procesador puede acceder en paralelo a los datos requeridos para su ejecución. Este paralelismo reduce la latencia y elimina el denominado “cuello de botella” presente en la arquitectura Von Neumann (*Von-Neumann vs Arquitectura de Harvard*, 2020).

La mayor ventaja que presenta esta arquitectura frente a la Von Neumann es el mayor rendimiento, ya que la posibilidad de acceder en paralelo a instrucciones y datos elimina el cuello de botella presente en la arquitectura Von Neumann, incrementando la velocidad de ejecución.

Sin embargo, la duplicación de buses y memorias incrementa la dificultad de implementación y requiere un mayor número de componentes, lo que también implica costos de fabricación más elevados.

- **Microcontrolador seleccionado:**

En esta tesis se utiliza el microcontrolador PIC18F25Q43 que pertenece a la familia de microcontroladores de 8 bits desarrollados por Microchip Technology. Este dispositivo es un microcontrolador, ya que integra en un solo dispositivo la unidad central de procesamiento (CPU), memoria de programa, memoria de datos y una amplia gama de periféricos. Esta integración lo convierte en una solución compacta y eficiente para aplicaciones embebidas.

El PIC18F25Q43 se basa en una arquitectura Harvard, característica de muchos microcontroladores de la familia PIC. En este modelo, la memoria de programa y la memoria de datos están físicamente separadas y cuentan con buses independientes, lo que permite acceder a instrucciones y datos de manera simultánea.

Este microcontrolador cuenta con múltiples periféricos que muestran a continuación:

La familia de microcontroladores PIC18-Q43 está disponible en dispositivos de 28/40/44/48 terminales para aplicaciones de control en tiempo real. Esta familia incorpora un Convertidor Analógico-Digital con Cómputo (ADCC) de 12 bits, que automatiza técnicas de Divisor de Voltaje Capacitivo (CVD) para detección táctil capacitiva avanzada, promediado, filtrado, sobremuestreo y comparación de umbrales.

Esta familia introduce un nuevo módulo de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) de 16 bits, el cual proporciona dos salidas independientes sobre la misma base de tiempo. Entre las características adicionales se incluyen un controlador de interrupciones vectorizadas con latencia fija para manejo de interrupciones, un árbitro del bus del sistema, capacidades de Acceso Directo a Memoria (DMA), UART con soporte para protocolos asíncronos, DMX,

DALI y LIN, además de interfaces de comunicación SPI e I²C. También incorpora funciones de memoria como Memory Access Partition (MAP) para apoyar a los usuarios en la protección de datos y aplicaciones de bootloader, así como Device Information Area (DIA), que almacena valores de calibración de fábrica para mejorar la precisión del sensor de temperatura.(PIC18F25Q43 | Microchip Technology, n.d.)

A continuación, se describen los módulos que considero especialmente importantes para el desarrollo de los acondicionadores propuestos.

- *Puerto UART*

El PIC18F25Q43 integra módulos de comunicación serial asíncrona, los cuales permiten implementar el protocolo UART de manera nativa. Este protocolo constituye una de las formas más simples y ampliamente utilizadas para el intercambio de datos entre sistemas embebidos, ya que requiere únicamente dos líneas físicas: TX (transmisión) y RX (recepción).

Si bien el UART es adecuado para comunicación punto a punto en distancias cortas, presenta limitaciones en entornos industriales o sistemas distribuidos:

- Sensibilidad al ruido electromagnético debido al uso de niveles TTL.
- Alcance reducido, típicamente menor a unos pocos metros.
- Imposibilidad de conectar múltiples nodos en un mismo bus sin hardware adicional.

Estas restricciones motivan la necesidad de emplear estándares eléctricos más robustos que permitan extender la comunicación a distancias mayores y con mayor inmunidad al ruido.

El estándar RS-485 surge como solución para aplicaciones donde se requiere comunicación confiable en ambientes hostiles y con múltiples dispositivos conectados. A diferencia del UART, RS-485 no define el formato lógico de los datos, sino la capa física de transmisión:

- Utiliza un par diferencial (líneas A y B) que cancela interferencias de modo común.
- Permite distancias de hasta 1200 m con velocidades estables.
- Soporta topologías multipunto, con decenas de nodos en un mismo bus.

El PIC18F25Q43 genera la trama UART, mientras que un transceptor RS-485 externo convierte las señales TTL del microcontrolador en señales diferenciales aptas para el bus. De esta manera, el UART actúa como la capa de enlace lógico, y RS-485 como la capa física que extiende su alcance y robustez.

- *I2C (Inter-Integrated Circuit)*

El protocolo I²C es un estándar de comunicación serial síncrono que permite conectar múltiples dispositivos electrónicos, como sensores, usando solo dos líneas: SDA (datos) y SCL (reloj).

Entre las principales características del protocolo I²C destacan:

- Direcciones únicas: cada dispositivo conectado al bus posee una dirección de 7 bits, y un bit que indica si el dispositivo se utiliza en modo lectura o escritura, lo que permite identificarlo de manera inequívoca.

- Transferencia de datos en tramas: cada comunicación se organiza en mensajes que incluyen una condición de inicio (start), dirección del esclavo, bits de datos, confirmaciones (acknowledge) y una condición de parada (stop).
- Simplicidad física: al requerir solo dos líneas, se reduce el número de conexiones y se facilita el diseño del circuito impreso.

- **Convertidor Analógico - Digital**

El microcontrolador PIC18F25Q43 incorpora un módulo avanzado de conversión analógica a digital denominado ADC, el cual ofrece una resolución de 12 bits y múltiples canales de entrada. Este periférico permite digitalizar señales analógicas provenientes de sensores o acondicionadores, transformándolas en valores binarios que pueden ser procesados directamente por la unidad central de procesamiento.

El proceso de conversión se basa en el método de aproximaciones sucesivas (SAR), que garantiza un equilibrio entre velocidad y precisión. Cada muestra analógica es cuantificada en un rango discreto de 4096 niveles, lo que proporciona una alta resolución para aplicaciones de instrumentación.

Características principales del ADC en el PIC18F25Q43:

- Resolución: 12 bits, equivalente a 4096 niveles de cuantificación.
- Número de canales: hasta 24 entradas analógicas seleccionables

- **Referencia de voltaje (FVR)**

El PIC18F25Q43 integra una referencia de voltaje para el ADC. Esta referencia es programable, los niveles de referencia son 1.024 V, 2.048 V y 4.096 V, lo que permite maximizar la resolución del convertidor analógico digital.

El uso del FVR proporciona ventajas relevantes:

- Simplicidad: al integrar una referencia interna, elimina la necesidad de emplear fuentes externas de precisión o referencias externas, reduciendo complejidad en el diseño.
- Flexibilidad: el seleccionar el nivel de referencia permite ajustar el intervalo de conversión de acuerdo con la señal analógica de entrada.

- **Memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)**

Es un tipo de memoria no volátil integrada en el PIC18F25Q43. Su principal característica es que conserva la información almacenada incluso cuando el dispositivo se encuentra apagado, lo que la convierte en un recurso esencial para guardar parámetros de configuración, identificadores o datos que deben mantenerse disponibles entre reinicios del sistema.

La escritura se realiza mediante instrucciones específicas del microcontrolador, que permiten almacenar un byte en una dirección determinada. Para la lectura se accede a la dirección deseada y se recupera el valor previamente grabado.

El PIC18F25Q43 cuenta con una memoria EEPROM con capacidad de 1 Kbyte, lo que evita el uso de componentes externos, lo que se traduce en la simplicidad de diseño y reducción de costos.

2.2 Aplicaciones del proyecto

En el desarrollo de esta tesis fue necesario crear aplicaciones específicas que permitieran al usuario interactuar de manera sencilla con los acondicionadores, facilitando las tareas de configuración, calibración y medición de las variables físicas. Estas aplicaciones cuentan con funciones particulares según el acondicionador al que están asociadas, lo que asegura un manejo intuitivo y eficiente de cada módulo. Asimismo, se diseñó una aplicación general que permite obtener mediciones de las cuatro variables de forma conjunta.

Para su implementación se seleccionó LabVIEW, un entorno de programación gráfica desarrollado por *National Instruments*, es reconocido por su sencillez y versatilidad, y de uso extendido en proyectos de instrumentación y control. Además, su empleo fue solicitado por el Instituto de Ingeniería, ya que dispone de licencias oficiales y porque es el entorno muy utilizado dentro del Instituto.

La comunicación entre las aplicaciones y los acondicionadores se establece mediante comandos definidos, enviados de forma ordenada para garantizar la correcta adquisición de las mediciones. De esta manera, el usuario puede interactuar con cada módulo sin necesidad de manipular directamente el hardware, lo que incrementa la confiabilidad y la facilidad de uso del sistema.

La principal característica de LabVIEW es el uso de diagramas de bloques y paneles frontales, que permiten diseñar aplicaciones de manera visual e intuitiva. Este enfoque gráfico facilita la construcción de aplicaciones. También se dispone de bloques, rutinas predefinidas, que simplifican las tareas, como la generación de gráficas, archivos de para almacenamiento de datos o la implementación de otras tareas. Estas funciones minimizan el tiempo de programación.

De esta manera, LabVIEW se convierte en un software esencial del sistema propuesto, al proporcionar una interfaz intuitiva y robusta para la gestión de datos, asegurando que la información obtenida de los módulos embebidos pueda ser interpretada y utilizada de manera eficiente en la toma de decisiones.

A continuación, se explican las variables físicas de los acondicionadores que se desarrollan en esta tesis para comprender su principio de medición, así como la importancia de ser medidas.

2.3 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la propiedad que poseen los materiales para permitir el paso de la corriente eléctrica, esto significa que el valor será más alto cuanto más fácil se mueva la corriente a través de un material. Los materiales conductores se dividen en dos tipos, los conductores de primera clase (también llamados conductores electrónicos) son los metales, que transfieren energía a través del flujo de electrones sin generar alguna variación en su naturaleza química. Los conductores de segunda clase (conocidos como conductores electrolíticos) son disoluciones de electrolitos, que transportan corriente por medio del movimiento de iones, lo que genera cambios químicos en las disoluciones.

Para describir a la conductividad comenzaremos haciendo uso de la conocida ley de ohm, que describe la relación entre la corriente eléctrica (I), el voltaje (V) y la resistencia (R) en un circuito eléctrico.

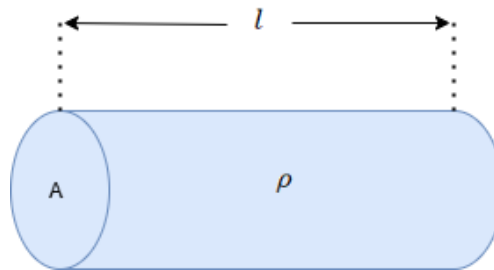
$$V = R * I \quad (1)$$

La resistencia es la oposición de un material al paso de la corriente eléctrica, sin embargo, la resistencia depende ampliamente de las propiedades intrínsecas del material. La resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca de un material que se opone al flujo de la energía eléctrica, se describe con la ecuación:

$$\rho = \frac{R * A}{l} \quad (2)$$

Donde l es la distancia entre los dos puntos donde el voltaje es medido y A es el área perpendicular a la dirección de la corriente. La resistividad se expresa como $[\Omega * m]$.

Ilustración 3: Diagrama de resistividad



Entonces la conductividad eléctrica es el inverso de la resistividad y por lo tanto describe la capacidad de los materiales de conducir corriente eléctrica.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

En el Sistema Internacional las unidades de la conductividad eléctrica son: $\left[\frac{S}{m}\right]$

Medir la conductividad eléctrica en el agua sirve para evaluar su calidad, ya que es un indicador de la cantidad de iones presentes en el agua, ya sea en forma de sales, minerales u otros contaminantes.

2.4 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH es una medida que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa, basada en la concentración de iones de hidrógeno (H^+) e iones hidróxido (OH^-).

Se mide en una escala logarítmica de 0 a 14. Donde los valores de (0 – 6.9) indican un pH ácido, y los valores de (7.1 – 14) indican un pH básico. El valor intermedio (7) indica un pH neutro.

Una solución ácida es una sustancia que tiene una concentración elevada de iones de hidrógeno (H^+). Una solución básica o alcalina es una sustancia que tiene una concentración elevada de iones de hidróxido (OH^-).

Medir el pH en el agua es fundamental ya que puede afectar diversos procesos. El valor ideal del agua potable es 7, es decir un pH neutro. Cuando el pH del agua es neutro puede ser utilizada en procesos industriales, para agricultura, y para generar agua potable.

La medición del pH en soluciones acuosas puede realizarse mediante diferentes tecnologías, cada una con características particulares en cuanto a precisión, rango de operación y facilidad de integración:

- Electrodo potenciométrico: son los más utilizados en aplicaciones industriales y de laboratorio. Funcionan midiendo la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo sensible al ion hidrógeno y un electrodo de referencia. Ofrecen alta precisión en un rango típico de 0 a 14 pH, y entregan una salida de forma lineal. Su principal ventaja es su bajo costo y su fácil instalación.
- Sensores de estado sólido: emplean transistores sensibles a iones de hidrógeno. Presentan buena estabilidad, respuesta rápida y menor fragilidad que los electrodos de vidrio. Su rango de operación también cubre 0 a 14 pH, con una respuesta prácticamente lineal.
- Sensores ópticos: utilizan indicadores químicos que cambian de color en función del pH, detectado mediante sistemas fotométricos o espectroscópicos. Son útiles en aplicaciones específicas, aunque su precisión depende de la estabilidad del reactivo y de las condiciones de iluminación.
- Sensores digitales modernos: integran el electrodo de vidrio o tecnologías equivalentes con electrónica interna que realiza la conversión analógica-digital y transmite los datos mediante protocolos como UART o I²C. Simplifican la integración en sistemas embebidos y reducen la necesidad de circuitos externos de acondicionamiento.

En el contexto de las lagunas de tratamiento de aguas residuales, donde es necesario contar con mediciones continuas y confiables, los electrodos potenciométricos siguen siendo la opción más utilizada debido a su precisión y amplio rango de operación.

2.5 Nivel

Las lagunas de tratamiento en las que se instalarán los sensores son sistemas biológicos que dependen de la acción de microorganismos y de la energía solar para llevar a cabo los

procesos de depuración. Por esta razón, dichas lagunas no suelen ser profundas: si la columna de agua fuera demasiado alta, la radiación solar no penetraría de manera suficiente y los procesos biológicos perderían eficacia.

En contraste, estas lagunas se caracterizan por abarcar grandes superficies, lo que hace imprescindible contar con una medición precisa del nivel de agua, ya que incluso variaciones mínimas pueden representar cambios significativos en el volumen total manejado.

Al comprender las características físicas de las lagunas, se observa que medir grandes profundidades no constituye una prioridad; en cambio, resulta fundamental detectar pequeñas variaciones de nivel, pues en sistemas de gran extensión una diferencia de apenas unos centímetros puede implicar un cambio volumétrico considerable.

Por ello, la medición continua y precisa del nivel de agua es esencial para mantener un control adecuado y tomar decisiones oportunas respecto a los procesos que garantizan el correcto funcionamiento de las lagunas.

La medición del nivel de agua en lagunas de tratamiento puede realizarse mediante diferentes tecnologías, cada una con ventajas y limitaciones según el entorno y las condiciones de operación:

- Sensores de presión: se basan en la relación entre la altura de la columna de agua y la presión ejercida en el fondo. Son adecuados para aplicaciones sumergidas y ofrecen muy buena precisión siempre y cuando se seleccione el intervalo adecuado del sensor.
- Sensores capacitivos: utilizan la variación de capacitancia entre dos electrodos en función del nivel de líquido. Son sensibles y permiten detectar cambios pequeños en el nivel, aunque presentan limitaciones cuando se emplean en aguas residuales. En este tipo de entornos, el alto nivel de contaminantes y la acumulación de sólidos o materia biológica pueden adherirse a los electrodos, provocando que permanezcan húmedos de manera constante y alterando la medición.
- Sensores ultrasónicos: miden el tiempo de tránsito de una onda acústica reflejada en la superficie del agua. Son ideales para aplicaciones sin contacto, aunque su precisión puede disminuir en presencia de espuma o turbulencia.
- Sensores de radar: emplean ondas electromagnéticas para determinar la distancia hasta la superficie del agua. Ofrecen alta precisión y estabilidad, incluso en condiciones adversas, pero su costo es elevado, últimamente han aparecido en el mercado sensores de bajo costo con muy buena resolución.
- Interruptores de flotador: dispositivos mecánicos que detectan el nivel mediante el movimiento de un flotador. Son económicos y robustos, aunque presentan poca resolución en la medición, lo que los hace menos precisos y adecuados únicamente para aplicaciones de control básico.

En el contexto de las lagunas de tratamiento de aguas residuales, donde se requiere detectar variaciones pequeñas de nivel en superficies extensas, los sensores de presión resultan particularmente adecuados. Estos dispositivos permiten una medición continua, presentan buena resistencia a la inmersión prolongada y ofrecen una relación costo-beneficio favorable frente a tecnologías más avanzadas como radar o ultrasonido.

2.6 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que indica el grado de frío o calor de un cuerpo o del ambiente, y se expresa comúnmente en grados Celsius (°C).

La medición de la temperatura en una laguna de aguas residuales resulta esencial, ya que regula la actividad de los microorganismos responsables de los procesos biológicos de depuración. Cuando la temperatura se encuentra fuera del rango óptimo, la eficiencia del tratamiento disminuye y puede comprometer la calidad del agua obtenida.

Por esta razón, es indispensable monitorear esta variable de manera periódica, con el fin de mantener un control adecuado y asegurar el funcionamiento eficiente de las lagunas de tratamiento.

Para medir la temperatura existen diversos tipos de sensores, cada uno con características particulares en cuanto a rango de operación, linealidad y precisión.

- RTD (Resistance Temperature Detector): generalmente fabricados en platino, presentan una respuesta prácticamente lineal y estable en un rango amplio que va de -200°C a 850°C . Su principal ventaja es la alta precisión, aunque su costo y la necesidad de circuitos de acondicionamiento más complejos limitan su uso en aplicaciones de bajo presupuesto.
- Termistores: elaborados con materiales semiconductores, ofrecen una elevada sensibilidad en intervalos reducidos, con rangos típicos de -50°C a 150°C . Sin embargo, su respuesta es no lineal, lo que requiere técnicas de compensación matemática para obtener lecturas precisas.
- Termopares: se basan en la unión de dos metales distintos, permiten medir temperaturas, desde -200°C hasta 1750°C , dependiendo del tipo. Y aunque son económicos debido a su simplicidad, presentan una salida muy pequeña y no lineal, lo que dificulta su acondicionamiento, comparado con otros sensores. Además, al ser su medición diferencial con respecto a un punto, comúnmente llamado unión fría, cualquier error al determinar o fijar la temperatura de la unión fría produce un error en la medición, por lo que no son recomendables para mediciones cercanas al medio ambiente.
- Sensores de semiconductores: constituyen una alternativa ampliamente utilizada en sistemas embebidos. Su rango de operación típico es de -40°C a 125°C , con una respuesta lineal, lo que facilita el procesamiento de la señal. Estos dispositivos son compactos, económicos y se integran fácilmente a microcontroladores mediante entradas analógicas o interfaces digitales.

En el contexto de las lagunas de tratamiento de aguas residuales, donde la temperatura del agua se encuentra típicamente entre 0°C y 40°C , el uso de sensores de semiconductores resulta el más adecuado. Estos dispositivos cubren de manera precisa el rango requerido, ofrecen una respuesta lineal, además presentan ventajas en cuanto a costo y facilidad de integración con microcontroladores, lo que los convierte en la opción ideal para esta aplicación.

3. Diseño de la estación modular

La decisión de diseñar una estación modular responde a la necesidad de contar con una arquitectura flexible y replicable, capaz de adaptarse a diferentes aplicaciones sin comprometer la homogeneidad del sistema. Para ello, se definió una estructura común en los circuitos principales, manteniendo dimensiones y formatos estandarizados que permiten apilar o sustituir módulos sin alterar el diseño global.

De esta forma, lo único que se difiere en cada caso es el circuito de acondicionamiento específico de acuerdo con la variable a medir. Asimismo, la programación asociada al microcontrolador se ajusta en función del acondicionador incorporado, garantizando que el sistema pueda reconocer y gestionar de manera independiente cada módulo.

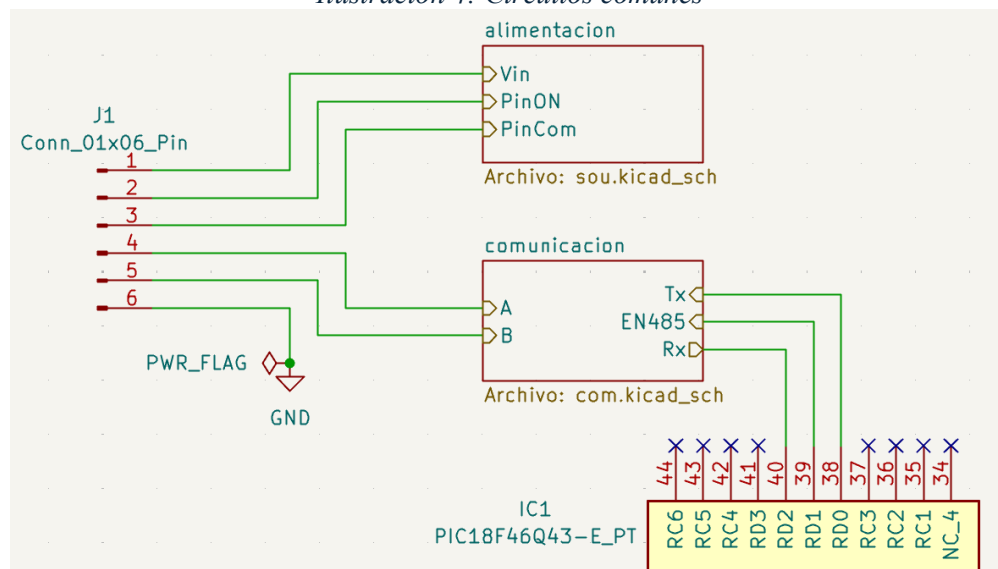
Dentro de las ventajas que ofrece esta arquitectura modular destacan la flexibilidad para seleccionar distintos acondicionadores en función de la aplicación, así como la posibilidad de añadir nuevos módulos sin necesidad de modificar el sistema completo.

Asimismo, el mantenimiento y la calibración se simplifican, ya que cada acondicionador puede trabajarse de manera individual, lo que facilita tanto la intervención técnica como la verificación de su correcto funcionamiento.

Además, los acondicionadores pueden ser controlados desde el microcontrolador que administra toda la estación. De esta manera, es posible activarlos solo cuando se requieren, reduciendo el consumo energético y maximizando la vida útil de los componentes y sensores.

Para la comunicación, todos los acondicionadores emplean el protocolo RS-485, un bus diferencial que permite la conexión de múltiples módulos en una misma red. La comunicación está aislada respecto al resto del acondicionador mediante optoacopladores, lo que elimina corrientes parásitas que podrían distorsionar las mediciones y garantiza la integridad de los datos. Este aislamiento, además, permite que cualquier acondicionador pueda desconectarse completamente sin afectar el funcionamiento de la red ni comprometer la estabilidad del sistema.

Ilustración 4: Circuitos comunes



Cada acondicionador dispone de su propio circuito de alimentación y de su propio circuito de comunicaciones aisladas; sin embargo, estos bloques son idénticos en todos los módulos. Asimismo, la conexión destinada a las líneas de programación de los microcontroladores es igual en cada acondicionador.

A continuación, se describen estos circuitos comunes —alimentación, comunicaciones y conexiones de programación— presentes en cada módulo acondicionador independiente.

3.1 Circuito de alimentación

Lo primero que se explicará es la parte de la alimentación, ya que es la encargada de suministrar energía a toda la electrónica que más adelante se explicará. Es importante aclarar que se tomó la decisión de que la fuente de alimentación sea de 5 V, ya que de esta forma podemos obtener alimentación tanto para la parte digital, como para la parte analógica.

El componente principal del circuito de alimentación es un convertidor “DC-DC PRM3W-E12-D5-S”, con un intervalo de entrada de 3.5 V a 36 V y es capaz de entregar hasta 3 W de potencia. Este dispositivo cuenta con una salida bipolar de 5 V.

Al convertidor se le añaden capacitores de desacoplo para minimizar el ruido en las líneas de alimentación. Con el objetivo de minimizar las perturbaciones que ocasionan los circuitos digitales, se alimenta de la fuente de +5V a través de un filtro LC de segundo orden.

Debido al editor utilizado se agregó una resistencia de 0 Ω que permite mantener separadas, en el editor, las líneas de tierra digital y analógica.

Para la alimentación de todo el sistema de comunicaciones existe un interruptor adicional, de manera que es posible desconectar completamente la estación si fuera necesario. Se emplea el dispositivo “TPS2069”, el cual opera en un rango de 2.7 V a 5.5 V y ofrece protección integrada contra sobre corriente y sobre temperatura.

Este interruptor entrega a la salida el mismo voltaje que recibe en la entrada, que en este caso es el voltaje de una terminal digital, por lo que idealmente tendrá una tensión de 3.3 V, adecuada para la lógica de control. La activación del dispositivo depende de una terminal externa, lo que permite al controlador gestionar de forma directa el encendido o apagado de la comunicación.

Finalmente contamos con las siguientes líneas de alimentación:

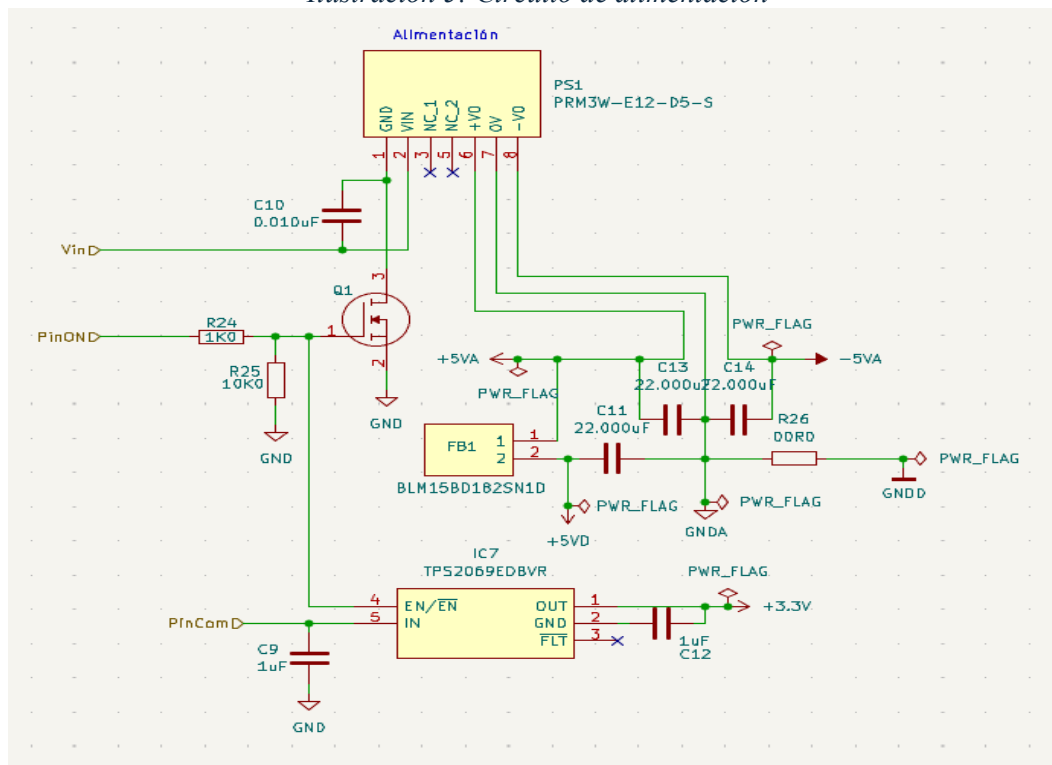
- +5 VA (Alimentación positiva analógica)
- -5 VA (Alimentación negativa analógica)
- GNDA (Tierra analógica)
- +3.3 V (Alimentación de la comunicación)
- +5 VD (Alimentación digital)
- GNDD (Tierra digital)

Además, se incorpora un transistor MOSFET, de la serie BSS316NH6327, un dispositivo de potencia caracterizado por su alta velocidad de conmutación.

Gracias a este componente es posible controlar el encendido y apagado de todo el circuito mediante una terminal externa, lo que permite apagar, por completo cada acondicionador de manera independiente y controlada.

Esta estrategia de diseño aporta flexibilidad y eficiencia, al garantizar que cada módulo pueda desconectarse sin afectar al resto de la estación.

Ilustración 5: Circuito de alimentación



3.2 Circuito de comunicaciones

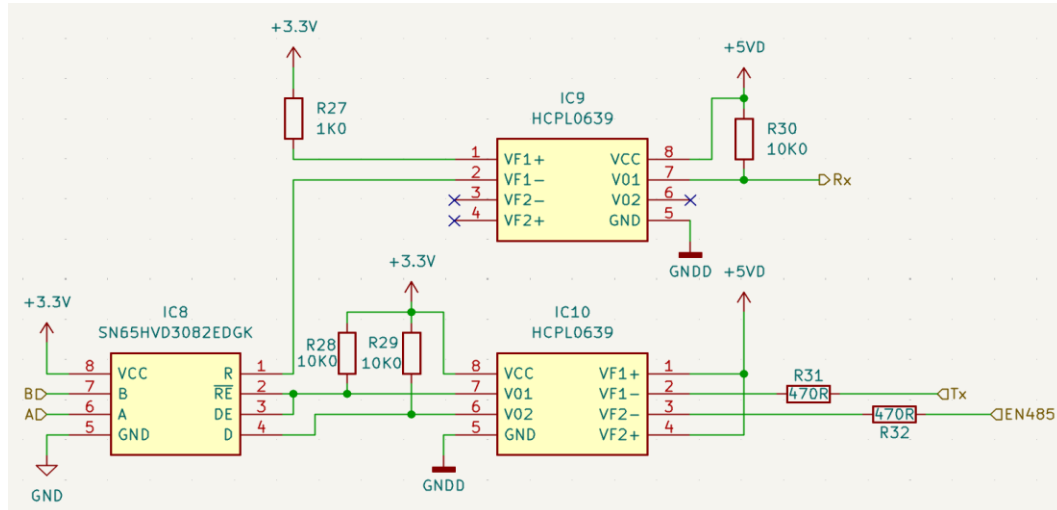
Se tomó la decisión de utilizar el estándar de comunicación RS-485 sin embargo, el microcontrolador no puede interpretar directamente este tipo de señal diferencial. Para ello se emplea el transceptor “SN65HVD3082EDGKR”, el cual actúa en la capa física del sistema de comunicación.

Este dispositivo convierte las señales lógicas del microcontrolador en señales diferenciales compatibles con el bus RS-485, y a su vez recibe las señales diferenciales del bus para entregarlas nuevamente como datos UART al microcontrolador.

De esta forma, el microcontrolador puede enviar y recibir información mediante su interfaz UART, mientras que el transceptor asegura la transmisión y recepción confiable de los datos en el bus de comunicación diferencial RS-485.

Se emplean optoacopladores de la serie HCPL0639 con el fin de aislar galvánicamente la electrónica del acondicionador, lo cual resulta de gran importancia, ya que al no compartir referencia eléctrica se reducen las corrientes parásitas que podrían afectar las mediciones analógicas de los sensores.

Ilustración 6: Circuito de comunicaciones



En la estación modular, se aprovechan dos canales para las entradas del transceptor (Tx y Enable) y un canal para la salida (Rx). La principal ventaja de implementar esta arquitectura de comunicación es la posibilidad de controlar múltiples módulos a través del bus RS-485, garantizando que las referencias de tierra analógica de cada sensor permanezcan independientes.

Gracias a este aislamiento, se evita que las perturbaciones eléctricas generadas en un acondicionador afecten a los demás, asegurando así que las mediciones analógicas se mantengan precisas y confiables en todos los módulos de la estación.

En el microcontrolador con formato SSOP 28 se utilizan las terminales (38) y (40) configuradas como TX y RX de comunicación UART respectivamente. Además, la terminal (39) se configura como salida digital para habilitar el envío o la recepción de datos en el transceptor. Todas las líneas se conectan a través de los optoacopladores antes explicados.

En el transceptor, la terminal (1) entrega al microcontrolador los datos recibidos desde el bus RS-485 ya convertidos al formato UART. La terminal (2) habilita o deshabilita la salida del receptor, mientras que la terminal (3) habilita el transmisor.

Ambas terminales están diseñadas de forma complementaria, por lo que pueden conectarse juntas y ser controladas por una única terminal digital del microcontrolador: al colocarla en alto se habilita la transmisión y al colocarla en bajo se habilita la recepción.

La terminal (4) recibe del microcontrolador los datos UART que el transceptor convierte en señal diferencial. Finalmente, las salidas diferenciales del bus RS-485 corresponden a las terminales A (6) y B (7), que transmiten la información hacia el medio físico de comunicación.

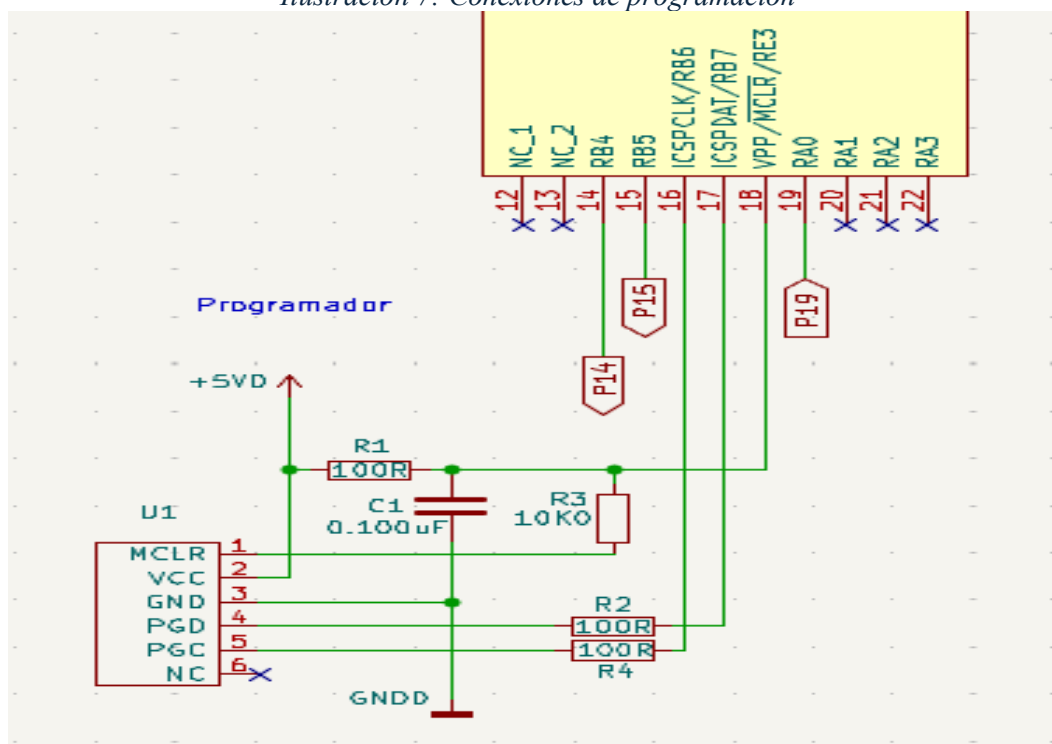
3.3 Conexiones de programación

Para programar el dispositivo, se requieren principalmente cinco líneas de conexión entre el circuito del microcontrolador y el programador, estas conexiones son:

- MCLR: funciona para generar reinicios en el dispositivo.
- VCC: permite que el dispositivo este energizado durante la programación.
- GND: referencia común de voltaje.
- PGD: Línea de datos seriales por donde se envía y recibe información del dispositivo.
- PGC: Línea de reloj que sincroniza la transferencia de datos.

A continuación, se muestra el esquema completo de conexiones:

Ilustración 7: Conexiones de programación



En el esquema, las resistencias R1, R2 y R4 de 100 Ω se emplean para limitar la corriente en las líneas de conexión, protegiendo al microcontrolador y al programador.

La resistencia R3 de 10 k Ω , junto con el capacitor C1 de 0.1 μ F, forman un circuito RC de retraso. Asegurando que el microcontrolador permanezca en estado de reinicio mientras la tensión de alimentación se estabiliza permitiendo un arranque confiable.

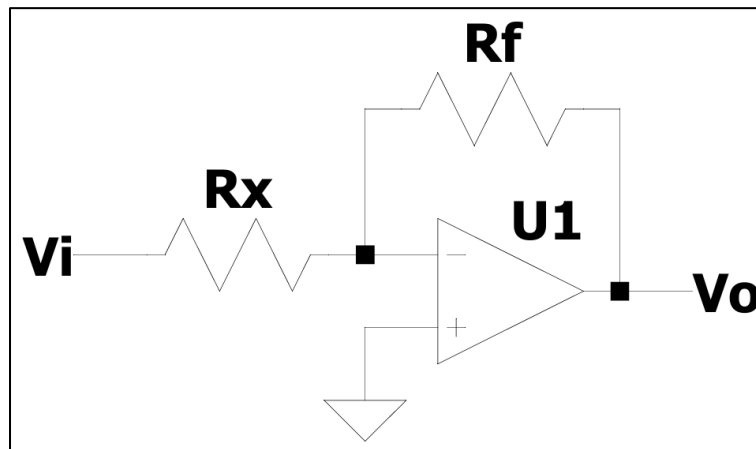
4 Módulo de Conductividad

4.1 Principio de funcionamiento

Como se explicó anteriormente la conductividad eléctrica tiene un efecto en la resistencia eléctrica de un material, y por lo tanto se puede medir utilizando circuitos eléctricos.

Partiendo por lo básico se utiliza un amplificador operacional en configuración inversora, a continuación, se muestra el circuito básico.

Ilustración 8: Circuito básico del acondicionador de conductividad



Donde:

- V_i es el voltaje de entrada
- R_x es la resistencia de entrada
- R_f es la resistencia de retroalimentación
- $U1$ es un amplificador operacional
- V_o es el voltaje de salida

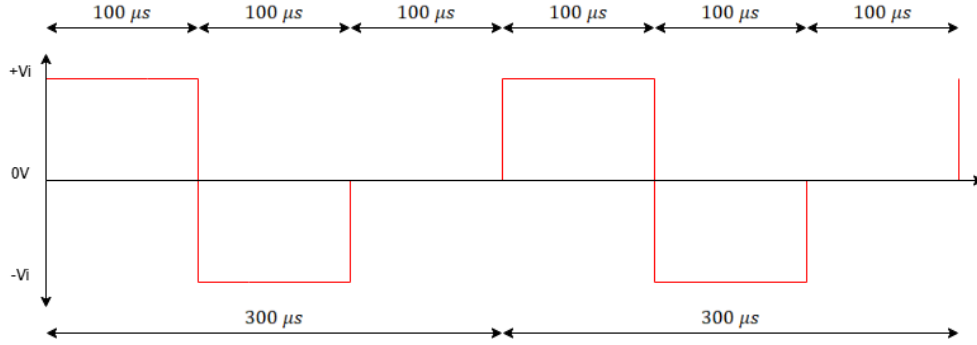
Es importante aclarar que V_i tiene que ser un voltaje de corriente alterna, ya que, si se aplica un voltaje de corriente directa, se genera un proceso de electrolisis en la muestra.

La electrolisis es un proceso químico que ocurre al aplicar una corriente eléctrica continua en una mezcla de agua con electrolitos, este proceso modifica las propiedades físicas y químicas del agua, lo que daña la muestra y modifica la medición.

Al ocurrir este proceso el agua con electrolitos se oxida para formar oxígeno en el ánodo, por otro lado, en el cátodo los iones de hidrógeno se reducen para formar hidrógeno gaseoso, por lo que los electrodos también se verían afectados y se generaría un daño permanente en el dispositivo de medición, por lo tanto, es un proceso que se debe evitar.

Para evitar la electrolisis se utiliza una señal de voltaje alterno para excitar la muestra de electrolitos. El patrón de la señal generada es el siguiente:

Ilustración 9: Señal de excitación [Vi]. Conductividad



La forma en que se genera esta señal y su propósito se explicarán más adelante.

En el circuito mostrado en la Ilustración 8, Rx es la resistencia que se pretende encontrar, es decir Rx corresponde a la muestra de agua con electrolitos donde se pretende calcular la conductividad.

Recordando la ecuación de salida de un amplificador inversor:

$$\therefore V_o = -V_i \left(\frac{R_f}{R_x} \right) \quad (4)$$

Ahora bien, este circuito se utiliza como medidor de corriente, ya que, si fijamos Rf en un valor constante conocido, y además se aplica un valor constante de voltaje en la resistencia de entrada, se genera una corriente que idealmente no se consume en la entrada inversora, sino que fluye a través de la resistencia de retroalimentación.

Lo que en realidad significa que el arreglo funciona como un amplificador de transimpedancia, ya que lo que realmente se pretende es convertir la corriente obtenida en una señal de voltaje.

Por lo tanto, la salida de voltaje del amplificador operacional es proporcional a la corriente de entrada, con una ganancia definida por Rf. Entonces ahora podemos decir que lo que se pretende medir es la corriente de salida:

$$V_o = -V_i \left(\frac{R_f}{R_x} \right) = I_P \quad (5)$$

Retomando la ecuación de la conductividad antes explicada(3):

$$\sigma = \frac{l}{A * R} \rightarrow \frac{l}{A} * \frac{1}{R}$$

Donde: $\frac{l}{A}$ es la constante de celda (K), ya que son parámetros que se asignan de forma arbitraria, por lo que podemos sustituir ambos términos en la ecuación de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{K}{R}$$

$$\therefore R = \frac{K}{\sigma} \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (5) tenemos:

$$IP = -Vi \left(\frac{Rf}{\frac{K}{\sigma}} \right)$$

Despejando a la conductividad:

$$\sigma = \frac{IP * K}{-Vi * Rf}$$

Sin embargo, si aseguramos que el voltaje es un valor constante, podemos obtener la siguiente ecuación:

$$\sigma = K * IP \quad (7)$$

Donde K es una constante que se puede obtener en el proceso de calibración que se explicará más adelante. IP corresponde a la corriente de salida del circuito.

Ahora bien, para garantizar que K es una constante hay que asegurar los intervalos de funcionamiento del amplificador operacional. Si hacemos esto podemos reducir el circuito eléctrico, ya que no será necesario añadir elementos para medir el voltaje de entrada.

Idealmente un amplificador operacional puede entregar tanta corriente como sea necesario en su terminal de salida, y debe ser capaz de mantener su terminal inversora con el mismo voltaje que la terminal no inversora. Sin embargo, esto no es cierto y se debe considerar, ya que, si se demanda más corriente de la que el amplificador es capaz de entregar, la respuesta se verá afectada y el resultado será incorrecto.

Para comenzar hay que aclarar que el acondicionador funciona con cuatro intervalos de medición, esto para abarcar un amplio intervalo de mediciones de conductividad. Los intervalos de funcionamiento dependen del voltaje de excitación y de la resistencia de referencia del circuito. Los intervalos se muestran a continuación:

Tabla 1: Intervalos de medición. Conductividad

Rango	0	1	2	3
Vi [V]	0.1	1	0.1	1
Rf [Ω]	100	100	10K	10K

Toda la electrónica esta alimentada con 5V, por la que la salida máxima del amplificador debe ser menor a eso para evitar saturación.

Recordando que en un amplificador inversor la corriente de retroalimentación, que también es la corriente que entrega el amplificador, se explica con la siguiente ecuación:

$$I_o = \frac{V_o}{R_f} \quad (8)$$

El amplificador operacional TLV9102 puede entregar máximo 40 mA, como margen de seguridad se usarán 30 mA máximo, para evitar errores en la medición. Entonces debe estimarse el voltaje máximo de cada intervalo usando la siguiente ecuación:

$$V_o max = I_o max * R_f$$

Con los cálculos del voltaje máximo podemos determinar los valores de resistencia mínima que puede medir cada intervalo. Para esto se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$R_{x_{min}} = V_i \left(\frac{R_f}{V_o max} \right) \quad (8)$$

A continuación, se muestra la tabla con los resultados de los cálculos de V_o máximos de cada intervalo:

Tabla 2: Resultados de V_o máximos de cada intervalo. Conductividad

Rango	$I_o max [mA]$	$V_o max [V]$	$R_{min} [\Omega]$
0	30	3	3.3
1	30	3	33.3
2	0.45	5	200
3	0.45	5	2000

Por otro lado, teóricamente el amplificador no tiene problemas con leer volates pequeños, sin embargo, para conservar un intervalo de medición claro se tomó la decisión de fijar el voltaje mínimo en 200 mV. Con esto podemos calcular la corriente mínima que entregará el amplificador en cada intervalo. Además, podemos calcular la resistencia máxima que puede medir el amplificador en cada intervalo con la siguiente ecuación:

$$R_{x_{max}} = V_i \left(\frac{R_f}{V_o min} \right) \quad (9)$$

A continuación, se muestra la tabla con los resultados de los cálculos de V_o mínimos de cada intervalo:

Tabla 3: Resultados de V_o mínimos de cada intervalo. Conductividad

Rango	$V_o min [mV]$	$I_o min [mA]$	$R_{max} [\Omega]$
0	200	2	50
1	200	0.02	500
2	200	2	5000
3	200	0.02	50000

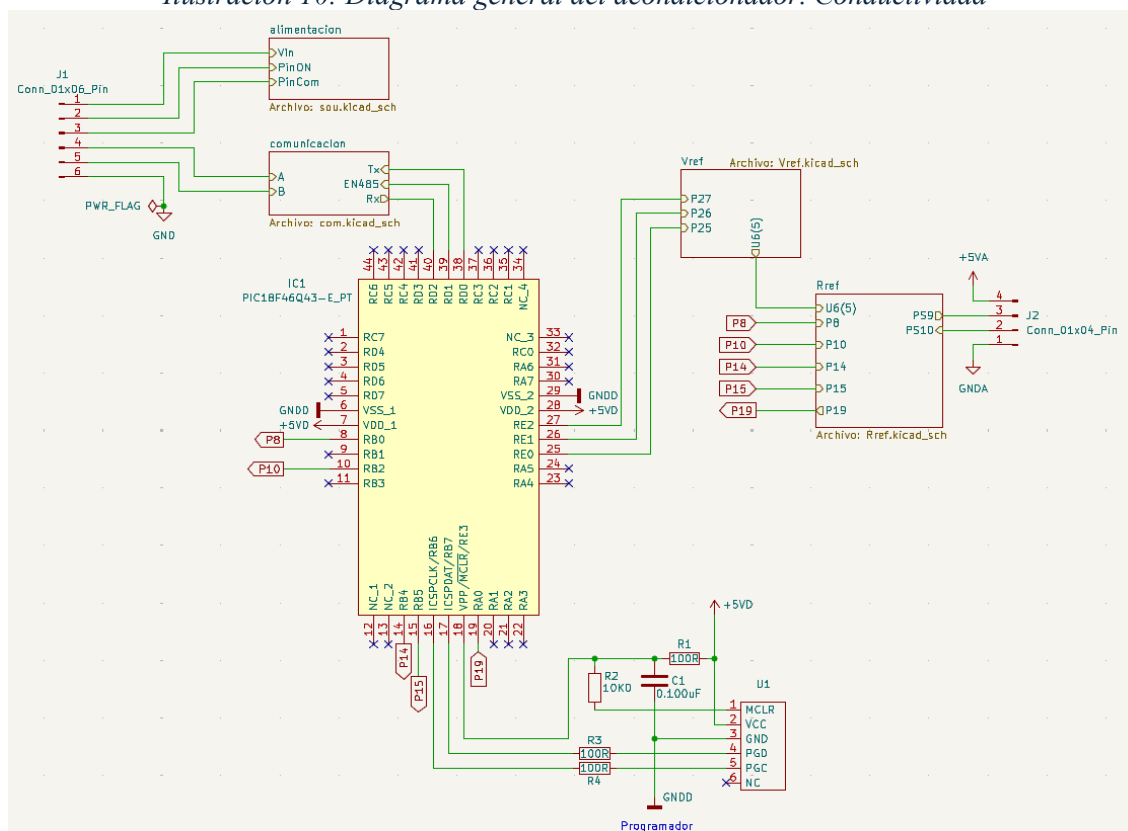
Con estos cálculos y resultados podemos estar seguros los intervalos funcionarán dentro de las condiciones adecuadas, con lo que podemos asegurar que las mediciones serán correctas sin necesitar de elementos adicionales para medir el voltaje de entrada.

4.2 Diseño del circuito

Como ya se mencionó el sensor de conductividad funciona como un amplificador de transimpedancia con una señal de excitación de corriente alterna. Sin embargo, se requieren de múltiples elementos para hacer funcionar este circuito.

A continuación, se muestra el circuito completo que incluye: generación de voltaje de excitación, selección de resistencias de retroalimentación y el circuito de retención y muestreo. Recordando que, al ser un módulo independiente, cuenta con los circuitos antes mencionados de alimentación, comunicación y de programación.

Ilustración 10: Diagrama general del acondicionador. Conductividad



Señal de excitación

Como se explicó previamente, para la generación de los intervalos se requieren dos voltajes bipolares: ± 1 V y ± 0.1 V. A continuación, se describe el procedimiento mediante el cual se obtienen los voltajes positivos, los voltajes negativos y la señal de excitación correspondiente.

En primer lugar, se emplea una referencia de voltaje de 2.5 V, proporcionada por el dispositivo LM4040DBZ-2.5, diseñado para entregar una salida fija con alta precisión, incluso ante variaciones térmicas. Posteriormente, se implementan divisores de voltaje, cuyos cálculos se detallan a continuación:

$$V_i = 2.5 V$$

$$R_2 = 1 k\Omega$$

$$V = V_i \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (10)$$

- Para $V = 1 V$:

Resolviendo para R_1 :

$$R_1 = 1.5 k\Omega$$

- Para $V = 0.1 V$:

Resolviendo para R_1 :

$$R_1 = 24 k\Omega$$

Adicionalmente, se incorporan capacitores de desacoplo con el propósito de atenuar el ruido de alta frecuencia presente en la alimentación del sistema.

La selección de los niveles de voltaje se realiza mediante el circuito integrado de conmutadores analógicos cuádruples DG212BDQ-E3, elegido por su baja resistencia en estado de conducción (ON), su capacidad para manejar señales bipolares y su rápida velocidad de conmutación.

Cada nivel de voltaje se selecciona a través de un conmutador analógico independiente; en conjunto con una compuerta lógica inversora SN74LVC1GU04DBVR, se determina el voltaje activo en cada momento. La compuerta NOT recibe la señal proveniente de la terminal digital (27) del microcontrolador, lo que permite invertir la lógica de selección y garantizar un esquema sencillo y confiable para alternar entre los valores de voltaje.

La lógica de selección es la siguiente:

- Terminal (27) en Bajo $\rightarrow V_i = 0.1 V$
- Terminal (27) en Alto $\rightarrow V_i = 1 V$

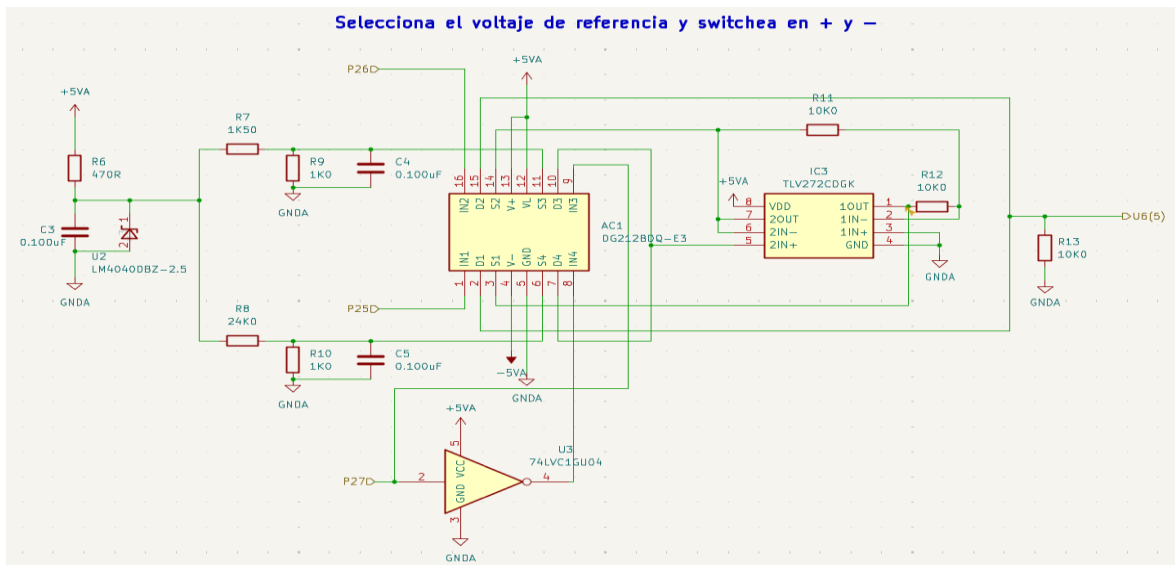
Haciendo uso de un amplificador en configuración seguidora de voltaje, que emplea el dispositivo TLV272CDGK, se logra un adecuado acoplamiento de impedancias. Este amplificador operacional dual riel a riel fue seleccionado por su capacidad de operar con alimentación de 5 V, su bajo voltaje de offset y su posibilidad de trabajar en todo el rango de entrada y salida.

De manera complementaria, el segundo amplificador del mismo dispositivo se implementa en configuración inversora con ganancia unitaria, utilizando resistencias de 10 k Ω para limitar la corriente y obtener un voltaje negativo de igual magnitud que el positivo. Esta etapa permite mantener la simetría entre las señales positiva y negativa.

Finalmente, se incorpora un amplificador en configuración seguidora, utilizando el dispositivo TLV9102IDR, elegido por su capacidad de operar a 5 V, su bajo ruido y bajo offset, lo que asegura estabilidad en la etapa final de acoplamiento de impedancias.

Además, se añade una resistencia pull-down en la terminal no inversora, que permite que la señal de excitación adopte rápidamente el valor de 0 V cuando se requiere, mejorando la precisión y la velocidad de transición.

Ilustración 11: Circuito de voltaje de referencia. Conductividad



La señal de excitación, además de ser una señal alterna, presenta tres estados: positivo, negativo y cero. Cada estado tiene una duración de 100 μ s, por lo que un ciclo completo abarca 300 μ s, equivalente a una frecuencia de 3.33 kHz.

Esta forma de onda y su frecuencia fueron seleccionadas tras analizar diversos dispositivos de medición de conductividad, observándose que la mayoría operan de manera confiable dentro de este intervalo.

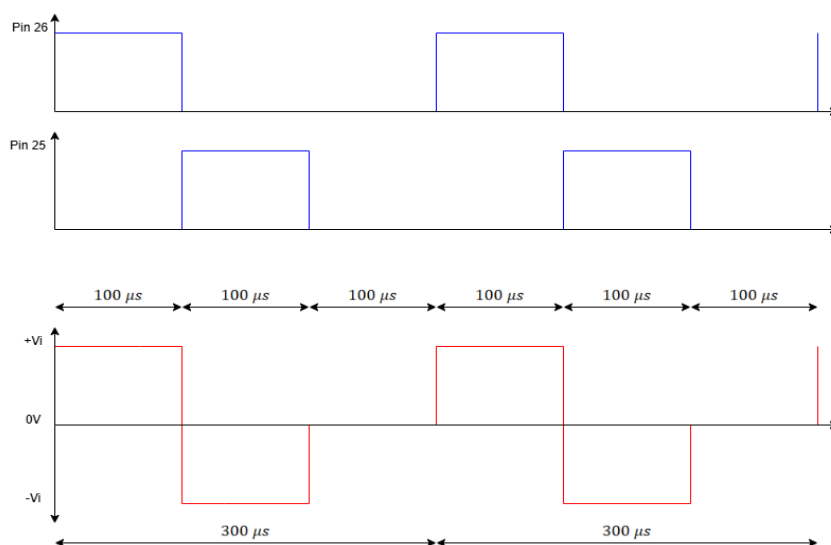
La generación de los tres estados se logra mediante la adecuada activación de las terminales digitales (25) y (26) del microcontrolador, las cuales controlan de manera independiente un interruptor analógico DG212BDQ-E3. El comportamiento lógico es el siguiente:

- Terminal (26) en Alto $\rightarrow$ interruptor cerrado $\rightarrow$ selección de voltaje positivo.
- Terminal (25) en Alto $\rightarrow$ interruptor cerrado $\rightarrow$ selección de voltaje negativo.
- Terminales (25) y (26) en Bajo $\rightarrow$ interruptores abiertos $\rightarrow$ voltaje en cero.

Con esta lógica de selección, y gracias al control de los interruptores DG212BDQ-E3, se obtiene la señal de excitación requerida para el acondicionador de conductividad.

A continuación, se presenta el diagrama de tiempo correspondiente, donde se ilustran las transiciones de las terminales digitales y su relación con los tres estados de la señal.

Ilustración 12: Diagrama de tiempo de señal de excitación. Conductividad



Resistencia de retroalimentación

Para modificar los intervalos de medición se emplean resistencias de retroalimentación de alta precisión al 0.1%, con valores de $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ y $R_2 = 100\ \Omega$. La elección de resistencias de tolerancia tan baja garantiza que las mediciones se realicen con exactitud y que los resultados no se vean afectados por variaciones significativas en los componentes pasivos.

La selección de estas resistencias se lleva a cabo mediante las terminales digitales (8) y (10) del microcontrolador, cada una conectada a un transistor digital NPN con resistencias integradas, específicamente el modelo PDTTC114YT-QVL. Este dispositivo simplifica el diseño al incorporar resistencias de polarización internas, reduciendo el número de componentes externos y asegurando una conmutación rápida y confiable.

Los transistores activan los relevadores HE3621A0500, que fueron seleccionados por su resistencia interna extremadamente baja en estado de conducción, lo que evita que se modifique el valor real de las resistencias de precisión.

En comparación con relevadores de estado sólido, los electromecánicos ofrecen una resistencia de contacto mucho menor y más estable, mientras que los de estado sólido suelen presentar una resistencia interna más elevada y dependiente de la temperatura, lo que puede introducir errores en las mediciones.

El amplificador encargado de la medición principal corresponde al segundo canal del dispositivo TLV9102IDR, este dispositivo se distingue por su ancho de banda de hasta 1.1

MHz, lo que asegura una respuesta dinámica adecuada para señales de excitación en el rango de kilohertz, y por su capacidad de entregar corrientes de salida de hasta ± 80 mA.

Los transistores digitales PDTTC114YT-QVL funcionan como inversores lógicos, de manera que, en conjunto con los relevadores electromecánicos HE3621A0500, permiten realizar la inserción de las resistencias de retroalimentación en el circuito de medición. El comportamiento es el siguiente:

- Terminal digital en alto $\rightarrow$ Transistor a tierra $\rightarrow$ Relevador cerrado $\rightarrow$ Resistencia seleccionada
- Terminal digital en bajo $\rightarrow$ Transistor en +5V $\rightarrow$ Relevador abierto $\rightarrow$ Resistencia no seleccionada

Esta lógica asegura una conmutación confiable y precisa. Adicionalmente, se incorporan diodos rápidos 1N4148W-TP como protección contra picos de voltaje generados durante el encendido y apagado de los relevadores. Estos diodos actúan como elementos de supresión, evitando que las sobretensiones transitorias afecten la integridad de los transistores y del resto del circuito, incrementando así la confiabilidad y la vida útil del sistema.

En los amplificadores operacionales puede presentarse el fenómeno de inestabilidad por margen de fase. Este ocurre cuando el valor de la resistencia de entrada se incrementa considerablemente, lo que provoca que la impedancia en el nodo inversor también aumente de manera significativa.

Bajo estas condiciones, el amplificador se vuelve muy sensible a las capacitancias parásitas presentes en el circuito, y además se introduce un polo adicional en alta frecuencia que incrementa el desfase y reduce el margen de fase, generando riesgo de oscilaciones.

Para evitar este efecto se emplean capacitores de compensación, los cuales se colocan en paralelo con la resistencia de retroalimentación en configuraciones inversoras. De esta manera, se logra estabilizar la respuesta en alta frecuencia y garantizar que las mediciones sean correctas.

El cálculo del capacitor de retroalimentación se realiza mediante la expresión:

$$C_f = \frac{1}{2\pi * R_f * f_c} \quad (11)$$

Donde R_f corresponde a la resistencia retroalimentación y f_c a la frecuencia de corte seleccionada. Para asegurar un amplio margen de tolerancia en la zona de estabilidad se utiliza $f_c = 150$ kHz. Resolviendo:

Con $R_f = 100\Omega$

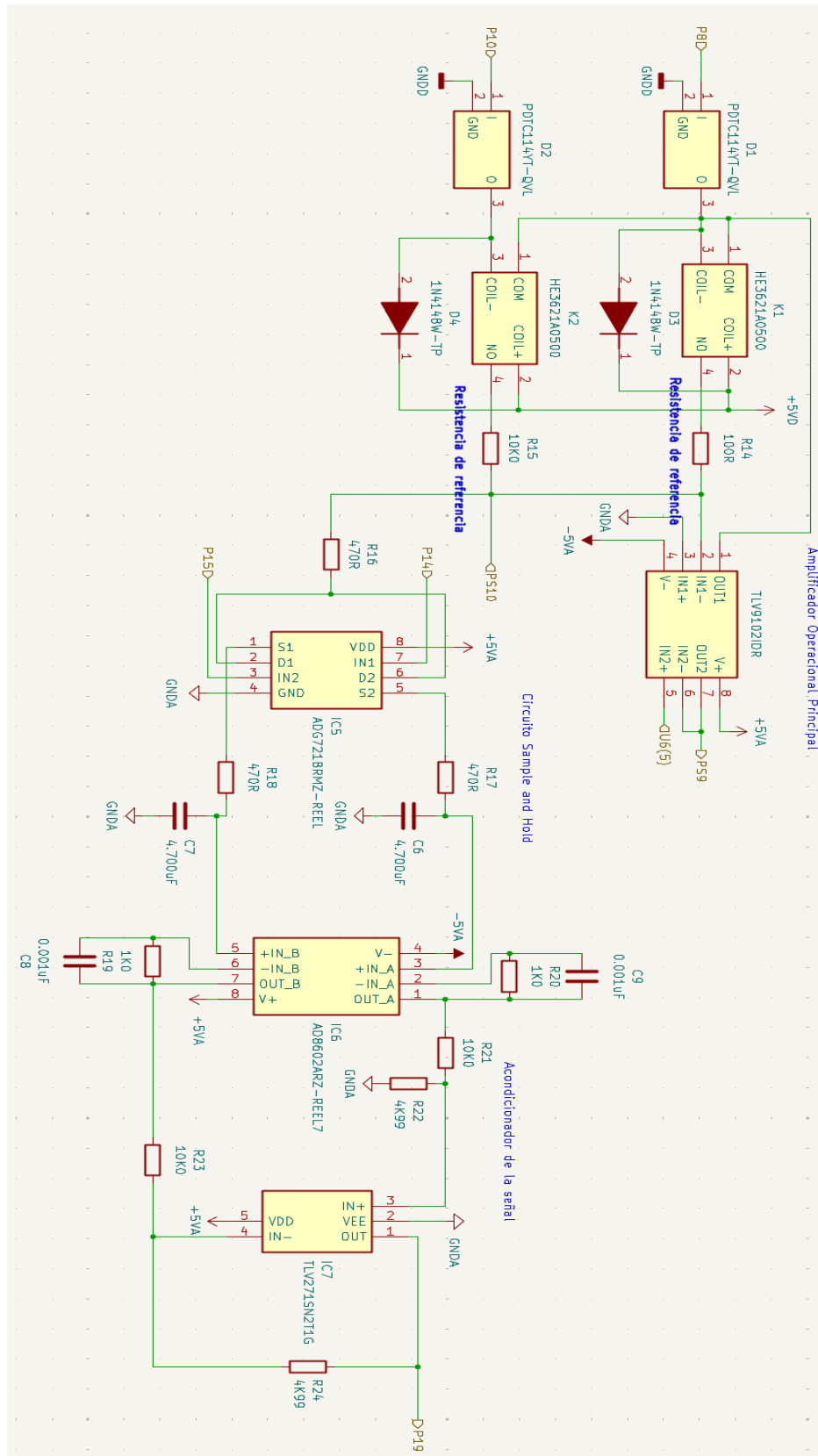
$$C_f \approx 10 \text{ nF}$$

Con $R_f = 10 \text{ k}\Omega$

$$C_f \approx 100 \text{ pF}$$

Estos capacitores se añaden en paralelo con su respectiva resistencia de retroalimentación, para evitar oscilaciones y garantizar que las mediciones sean correctas.

Ilustración 13: Acondicionador de conductividad



Circuito de retención y muestreo

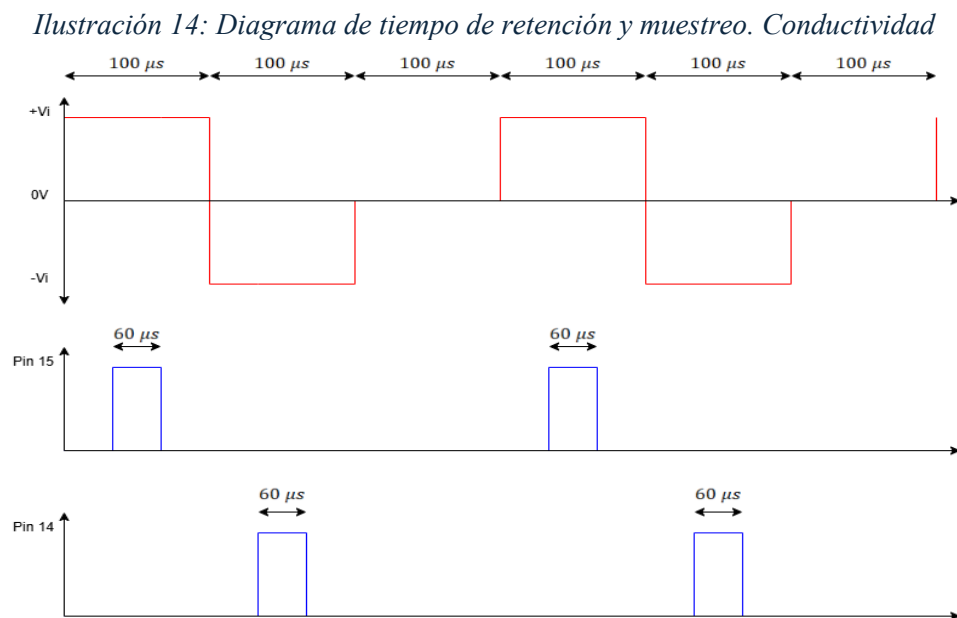
Por último, hay que medir la salida obtenida. Se sabe que la señal de excitación es bipolar, por lo que la salida del amplificador también lo será; sin embargo, el ADC del microcontrolador únicamente puede leer señales positivas, de modo que la señal debe ser tratada antes de ser digitalizada. Para ello se utiliza un circuito de retención y muestreo, el cual toma una muestra instantánea de la señal de entrada y la mantiene durante un intervalo de tiempo.

Este proceso se realiza mediante un par de interruptores analógicos y capacitores de $4.7\ \mu\text{F}$ que almacenan las señales deseadas. Los interruptores analógicos se encuentran integrados en el dispositivo ADG721BRMZ-REEL, un circuito integrado que ofrece baja resistencia de conducción y tiempos de conmutación rápidos.

Estas características aseguran que las señales muestreadas se transfieran a los capacitores con mínima distorsión y alta velocidad, lo que es esencial para capturar valores intermedios de la señal alterna.

Dado que la señal proviene de un amplificador en configuración inversora, la terminal (14) se emplea para capturar el estado negativo (que corresponde a un voltaje positivo en la salida), mientras que la terminal (15) se utiliza para capturar el estado positivo (que corresponde a un voltaje negativo). Al activarse la terminal, los interruptores se cierran y el voltaje en ese instante se transfiere a los capacitores, quedando almacenado.

Para evitar medir valores transitorios de la señal alterna, se busca capturar valores intermedios de los pulsos, lo cual se ilustra en el diagrama de tiempo de las terminales (14) y (15).



Después de cada capacitor de muestreo se incorpora un amplificador en configuración seguidora, acompañado de un filtro compuesto por una resistencia de retroalimentación de 1 k Ω y un capacitor de 1 nF en paralelo, con el fin de evitar el fenómeno de inestabilidad por margen de fase previamente descrito.

Haciendo uso de un amplificador operacional TLV271SN2T1G, configurado en modo diferencial con ganancia de 0.5, se logra transformar las señales muestreadas en una salida adecuada para el ADC. Este dispositivo es un amplificador riel a riel, capaz de operar con alimentación de 2.7 V a 5.5 V.

La configuración diferencial se implementa mediante una red de resistencias de 50 k Ω y 100 k Ω , que definen la relación de ganancia y aseguran la correcta atenuación de la señal. En esta etapa, el voltaje negativo se aplica a la entrada inversora y el voltaje positivo a la entrada no inversora. De esta forma, el amplificador calcula la diferencia entre ambas señales y la reduce a la mitad según la ecuación:

$$V_o = \frac{4.99 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} (V^+ - V^-) \approx 0.5 (V^+ - V^-)$$

El resultado es un voltaje siempre positivo, de esta forma el amplificador diferencial convierte la señal bipolar en un voltaje unipolar compatible con el ADC. Finalmente, la salida se encuentra lista para ser leída por el microcontrolador en la terminal (19), configurada como entrada analógica.

4.3 Programación

El objetivo de la programación de este acondicionador es habilitar dos modos de funcionamiento: modo automático y modo de calibración.

Es importante señalar que la programación está diseñada para operar en conjunto con una interfaz desarrollada en LabVIEW, con la cual se establece comunicación mediante el protocolo RS-485 utilizando comandos específicos. La descripción detallada de dicha interfaz se presentará más adelante.

El modo de calibración permite ajustar y verificar el desempeño del acondicionador. En este modo es posible seleccionar intervalos de medición de manera arbitraria para realizar pruebas con distintas muestras y observar su respuesta. Asimismo, se pueden ingresar nuevas constantes de calibración obtenidas mediante un proceso realizado desde la interfaz.

El modo automático debe ser capaz de interpretar el valor de voltaje obtenido de las mediciones periódicas y ajustar los intervalos de medición en función de este.

Como se mencionó anteriormente, toda la electrónica está controlada por un microcontrolador. Para este acondicionador se seleccionó el PIC18F25Q43, un controlador de 8 bits de la familia Microchip, diseñado para aplicaciones de alto rendimiento y bajo consumo.

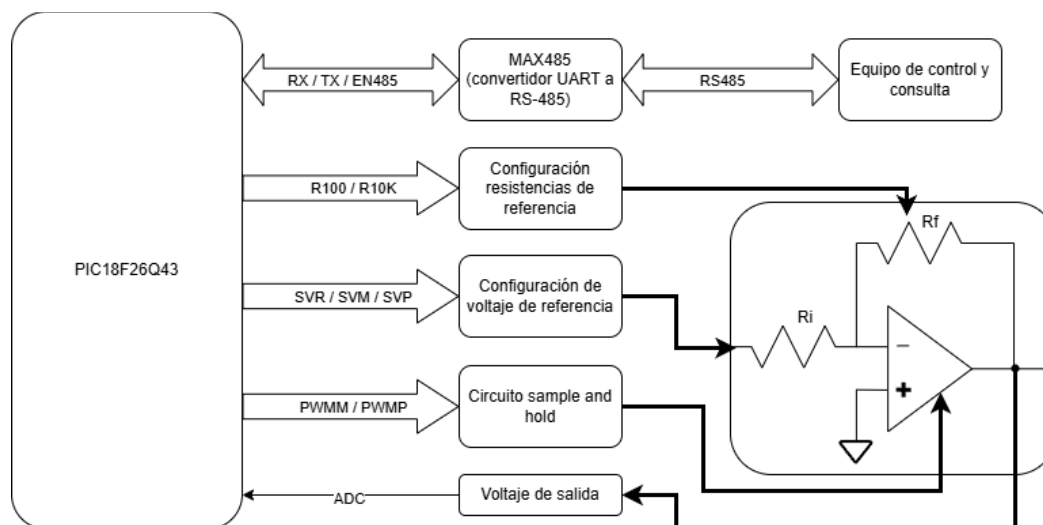
La elección de este microcontrolador se fundamenta en sus características técnicas: opera con un voltaje nominal de +5 V, dispone de una memoria EEPROM de 1 KB, puede alcanzar una velocidad de hasta 64 MHz, incorpora un ADC de 12 bits con una resolución mínima de 1.22 mV/bit en el rango de 0–5 V, lo que resulta adecuado para la medición precisa de señales analógicas en aplicaciones de acondicionamiento. Además, cuenta con 40 terminales cuya asignación de periféricos es altamente flexible.

La programación del microcontrolador se realizó en lenguaje C, dado que es el más utilizado en este tipo de aplicaciones y, en mi caso, el que domino con mayor facilidad. Además, es el lenguaje predeterminado en el entorno de desarrollo.

El entorno empleado fue MPLAB X IDE, la herramienta oficial desarrollada por Microchip, que ofrece soporte directo y alta compatibilidad con los microcontroladores PIC, también fabricados por la misma empresa. Para la programación se utilizó el PICKit 4, un programador y depurador en circuito de Microchip que permite programar y depurar microcontroladores PIC de manera rápida y eficiente dentro del entorno MPLAB X IDE.

Como se explicó anteriormente, las terminales utilizadas para el funcionamiento del acondicionador son diez digitales, encargadas de controlar la señal de excitación, la resistencia de retroalimentación, el circuito *de retención y muestreo* y las comunicaciones. Únicamente se emplea una terminal analógica, destinado a medir el voltaje de salida entregado por el acondicionador. A continuación, se presenta un diagrama de bloques que resume la función asignada a cada terminal:

Ilustración 15: Arquitectura del acondicionador. Conductividad



En la siguiente tabla se explican de forma detallada las terminales utilizadas, el periférico al que están asignados, su función, su dirección y su nombre asignado.

Tabla 4: Terminales utilizadas. Conductividad

Terminal física	Nombre de terminal	Periférico	Función	Dirección	Nombre asignado
40	RD2	UART2	RX2	Input	RX
38	RD0	UART2	TX2	Output	TX
19	RA0	ADCC	ANx	Input	IP
8	RB0	I/O digital	GPIO	Output	R100
10	RB2	I/O digital	GPIO	Output	R10K
14	RB4	I/O digital	GPIO	Output	PWMM
15	RB5	I/O digital	GPIO	Output	PWMP
39	RD1	I/O digital	GPIO	Output	EN485
25	RE0	I/O digital	GPIO	Output	SVM
26	RE1	I/O digital	GPIO	Output	SVP
27	RE2	I/O digital	GPIO	Output	SVR

Los diagramas de flujo que rigen el comportamiento de todo el sistema se presentan a continuación. El diagrama de flujo del funcionamiento general muestra, de manera resumida, cómo opera el sistema.

La etapa de inicio del sistema se encarga de inicializar todos los módulos requeridos mediante funciones dedicadas, con el fin de garantizar un funcionamiento correcto.

En este caso, se inicializan los siguientes:

- **CLOCK**: Configura el reloj interno del microcontrolador, necesario para operar a una frecuencia de 64 MHz.
- **PIN_MANAGER**: Define el estado inicial de las terminales de entrada/salida (GPIO).
- **ADC**: Prepara el convertidor analógico-digital, utilizado para leer señales analógicas; en este caso, mide el voltaje entregado por el acondicionador.
- **FVR**: Configura el Fixed Voltage Reference, una referencia interna de voltaje estable que sirve como base para mediciones analógicas. En este sistema se emplea un valor de 4.096 V.
- **NVM**: Inicializa la memoria no volátil (EEPROM) para lectura y escritura de datos.
- **UART2**: Configura el puerto serie UART2, utilizado para la comunicación.
- **INTERRUPT**: Activa y organiza el sistema de interrupciones, que permite responder rápidamente a eventos externos o internos. En este caso, las interrupciones se emplean para activar de forma automática un buffer que almacena bits de envío y recepción, garantizando una lectura de comandos eficaz.

Cabe mencionar que la configuración e inicialización de todos los módulos se realiza por medio de MCC (MPLAB Code Configurator), una extensión de MPLAB X IDE que permite configurar periféricos de microcontroladores PIC mediante una interfaz gráfica y generar automáticamente el código en C necesario para inicializarlos.

El modo automático depende exclusivamente del voltaje medido por el ADC del microcontrolador, por lo que cada intervalo de medición tiene un margen de funcionamiento claramente definido. A continuación, se presentan los márgenes de voltaje correspondientes a cada intervalo.

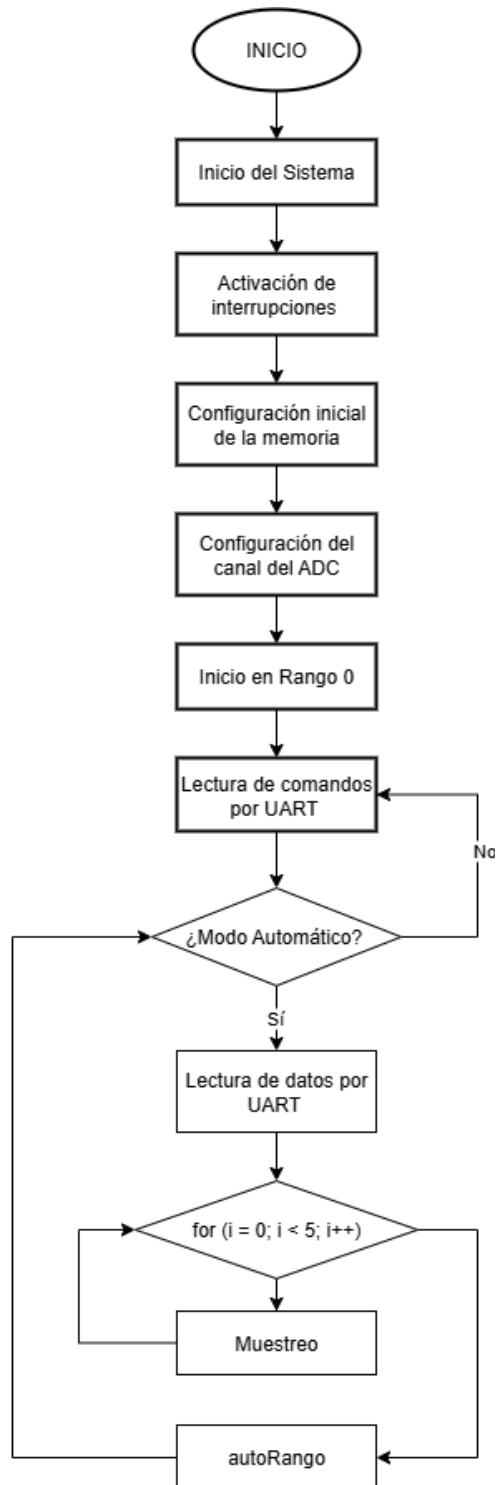
Tabla 5: Márgenes de voltaje de cada intervalo. Conductividad

Intervalo	V min [mV]	V max [mV]
0	100	3000
1	100	3000
2	100	5000
3	100	5000

Al ingresar en el modo automático, el sistema se configura por defecto en el intervalo 0. Posteriormente, comienza a realizar mediciones periódicas y, con base en los resultados obtenidos, determina si es necesario cambiar de intervalo.

Por ejemplo, si después de realizar mediciones en el intervalo 0 se detecta que el voltaje medido es menor a 100 mV, el código ejecuta un cambio hacia un intervalo superior hasta que el voltaje se encuentre dentro de los márgenes establecidos. El mismo procedimiento ocurre de manera inversa cuando el voltaje excede el límite superior del intervalo.

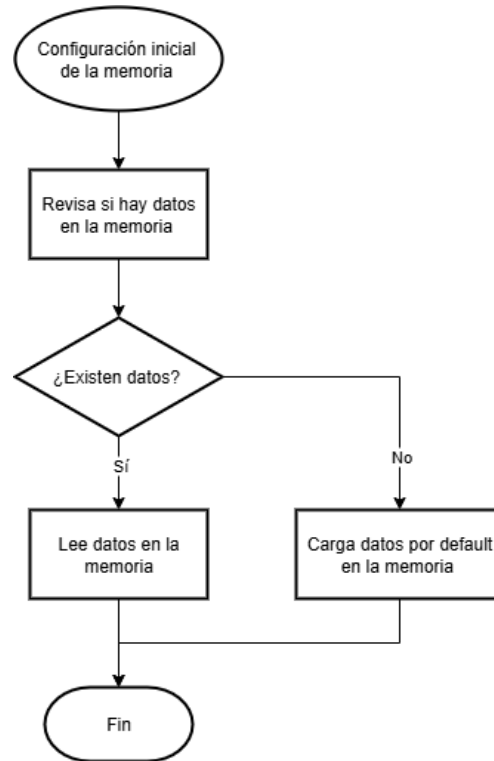
Ilustración 16: Funcionamiento general. Conductividad



En este acondicionador, la memoria se utiliza principalmente para almacenar las constantes de calibración correspondientes a cada intervalo de medición, dado que cada intervalo posee su propia pendiente y ordenada. Estos parámetros, combinados con los valores obtenidos en las mediciones, permiten calcular resultados mucho más acertados respecto al valor real.

La memoria empleada en este dispositivo es la *EEPROM*, un tipo de memoria no volátil que puede escribirse, borrarse y reprogramarse eléctricamente, lo que la convierte en una opción ideal para guardar configuraciones y datos permanentes.

Ilustración 17: Configuración de la memoria. Conductividad



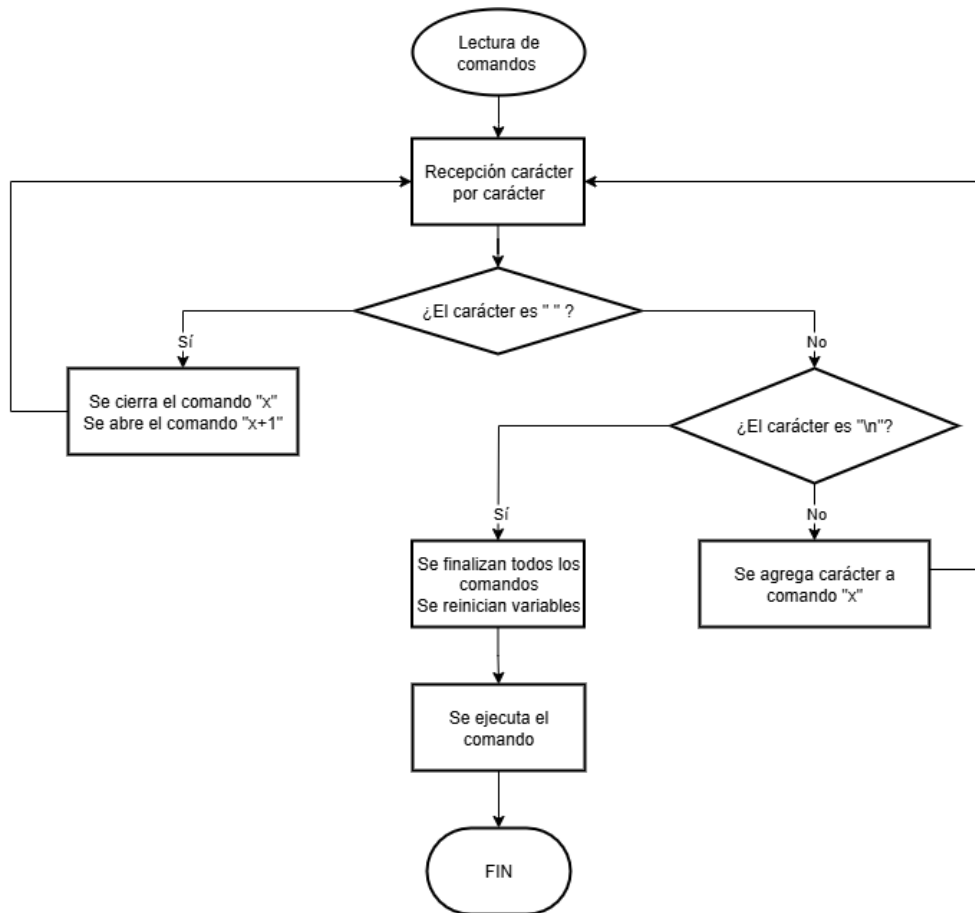
Es importante aclarar que tanto la pendiente como la ordenada de cada intervalo de medición son datos de tipo flotante, es decir, números con decimales. La memoria EEPROM únicamente permite almacenar datos de 8 bits por celda (un byte).

Para poder guardar valores de tipo flotante, se realiza una conversión a su representación en precisión simple (32 bits). Esto significa que cada dato flotante se almacena en 4 celdas de memoria, garantizando la correcta preservación de la información de calibración.

La lectura de comandos se realiza de forma continua mediante sondeo para verificar si existen datos de entrada en el bus de comunicaciones. Sin embargo, se emplean interrupciones para gestionar un buffer en el que se almacena una cadena, ya sea de envío o de recepción, con el propósito de evitar la pérdida de datos y asegurar que el sistema sea capaz de leer o transmitir el mensaje completo.

El tamaño del buffer, tanto para envío como para recepción, es de 64 bytes (64 caracteres). Con este tamaño se garantiza un almacenamiento suficiente para prevenir la pérdida de información incluso al enviar o recibir las cadenas de longitud mayor que son de aproximadamente 35 caracteres.

Ilustración 18: Lectura de comandos. Conductividad



Al recibir los caracteres, el código los analiza para realizar una separación en cadenas más cortas. Se emplea el carácter espacio (" ") para determinar dónde finaliza un comando y el carácter salto de línea ("\n") para reconocer el término de toda la cadena.

El sistema admite un máximo de tres comandos por cadena recibida. Existen dos tipos de comandos mediante los cuales el acondicionador se comunica con la interfaz:

Comandos sin argumentos: son aquellos en los que la cadena de recepción se divide únicamente en dos partes. La primera especifica la estación a la que se está llamando y la segunda indica la función que se desea ejecutar.

Tabla 6: Comandos sin argumentos. Conductividad

COMANDOS SIN ARGUMENTOS				
Estación	Separador	Comando		Terminador
CONXX	ESPACIO	XX		LF
XX (00 a FE) FF es llamada general usado para cambio de identificador	20_H	00	Regresa conductividad	0A_H
		01	Regresa corriente	
		R0	Configura rango 0 Regresa m y b	
		R1	Configura rango 1 Regresa m y b	
		R2	Configura rango 2 Regresa m y b	
		R3	Configura rango 3 Regresa m y b	
		RA	Inica Autorango	
		RR	Regresa Rango Actual, m y b	
		RC	Inicia modo calibración	

Tabla 7: Respuesta a comandos sin argumentos 1. Conductividad

RESPUESTA COMANDOS 00 y 01			
Estación	Separador	Conductividad o voltaje	Terminador
CONXX	Espacio	FF.FFFF	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador	20_H	Dos enteros y 4 decimales	0A_H

Tabla 8: Respuesta a comandos sin argumentos 2. Conductividad

RESPUESTA COMANDOS DE RANGO Y CALIBRACIÓN							
Estación	Separador	Rango	Separador	m	Separador	b	Terminador
CONXX	Espacio	X	Espacio	FF.FFFF	Espacio	FF.FFFF	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador	20_H	Un entero	20_H	Dos enteros y 4 decimales	20_H	Dos enteros y 4 decimales	0A_H

En los comandos con argumentos, la cadena de recepción puede dividirse en hasta tres partes.

- La primera parte especifica la estación a la que se está llamando.
- La segunda corresponde a la variable que se desea modificar.
- La tercera indica el dato que se desea almacenar en la variable seleccionada.

Tabla 9: Comandos con argumentos. Conductividad

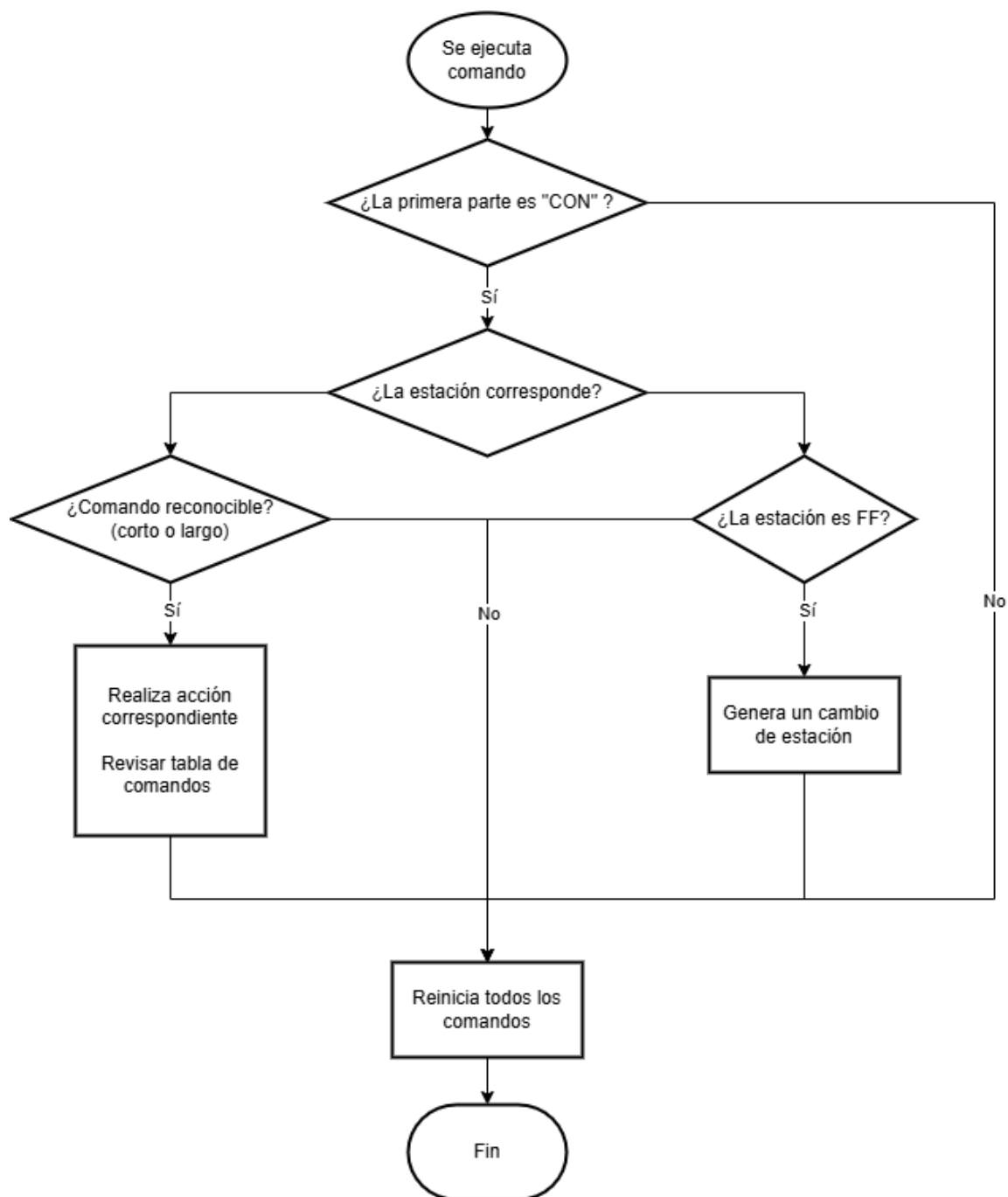
COMANDOS CON ARGUMENTOS					
Estación	Separador	Comando	Separador	Argumento	Terminador
CONXX	ESPACIO	XX	NULO		LF
XX (00 a FE) Si XX=FF llamada general solo aplica al cambio de estación	20_H	03 Pendiente 04 Ordenada 05 Estación	20_H	Pendiente y ordenada Flotantes Estación 00 a FE Hexadecimal	0A_H

Tabla 10: Respuesta de comandos con argumentos. Conductividad

RESPUESTA COMANDOS CON ARGUMENTOS							
Estación	Separador	Número de serie	Separador	Pendiente	Separador	Ordenada	Terminador
CONXX	Espacio	XXXX	Espacio	FF.FFFF	Espacio	FF.FFFF	LF
XX (00 a FE) Si se cambio la estación responde con el nuevo identificador	20_H	Hexadecimal 4 dígitos	20_H	Flotante, si se cambio envia la nueva pendiente de lo contrario la anterior	20_H	Flotante, si se cambio envía la nueva ordenada de lo contrario la anterior	0A_H

El sistema interpreta los comandos de la siguiente forma:

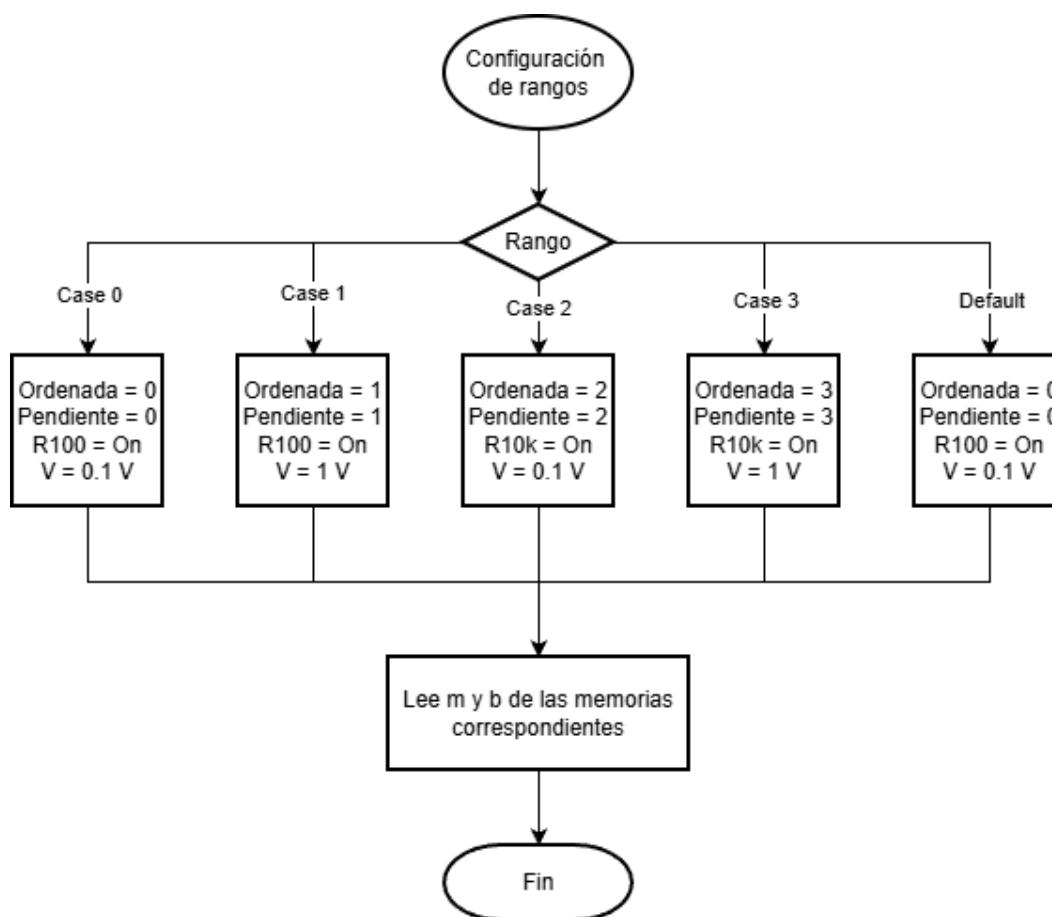
Ilustración 19: Ejecución de comandos. Conductividad



Una vez que los comandos han sido interpretados, los intervalos de medición pueden alternarse de manera sencilla, ya sea por solicitud explícita o de forma automática, dado que se encuentran controlados mediante una estructura switch - case, la cual garantiza que únicamente se seleccione un intervalo a la vez.

Al seleccionarse un intervalo, las terminales previamente descritas se activan o desactivan para configurar correctamente el sistema. Además, se leen las constantes de calibración correspondientes al intervalo elegido directamente desde la memoria EEPROM, ya que dichas constantes permanecen en uso hasta que se realice un nuevo cambio de intervalo.

Ilustración 20: Configuración de los Intervalos. Conductividad



Finalmente, es importante señalar que el código se ejecuta de manera cíclica durante todo el tiempo de operación, asegurando la supervisión continua del sistema. Este ciclo se mantiene activo hasta que el acondicionador de conductividad sea desenergizado, momento en el cual se detiene por completo la ejecución.

4.4 Desarrollo de la aplicación

La aplicación desarrollada para evaluar, calibrar y ajustar el acondicionador de conductividad fue implementada bajo LabVIEW, de National Instruments. Esta aplicación dispone de dos modos de operación: modo automático y modo de calibración.

Es importante señalar que la comunicación entre la aplicación y el sistema se establece inicialmente mediante USB. Sin embargo, ya que el acondicionador opera bajo una comunicación RS-485, se requiere un módulo para convertir el formato de USB a RS-485.

Ilustración 21: Método de comunicación general



La aplicación está compuesta únicamente por una pantalla principal, desde la cual es posible acceder a todas las funciones disponibles.

En esta interfaz se pueden calibrar cuando se selecciona el modo de calibración, o bien visualizar directamente las medidas de conductividad cuando se utiliza el modo automático.

Ilustración 22: Aplicación de acondicionador. Conductividad



A continuación, se explica el funcionamiento y los pasos recomendados para su correcto uso.

1. *Configurar puerto de comunicación USB*

El adaptador emula a un puerto serial, por lo que es necesario identificar y seleccionar o asignar el número del puerto de COM al cual está conectado el módulo. En la mayoría de los casos.

Si este procedimiento no se realiza correctamente, la aplicación no se inicializará de forma correcta generándose un error que impide su funcionamiento.

Ilustración 23: Selección de puerto. Conductividad



2. *Inicio programa*

Para iniciar el programa únicamente se debe ejecutar la aplicación compilada con el nombre “Conductividad”.

3. *Introducir datos iniciales*

Al iniciar la aplicación, se muestra un mensaje emergente que solicita al usuario seleccionar la estación con la cual se desea establecer comunicación.

Adicionalmente, se requiere ingresar el nombre del usuario, de manera que, en caso de realizar modificaciones en los parámetros de calibración, quede registrado quién efectuó dichos cambios.

Ilustración 24: Datos iniciales. Conductividad



4. Modo Automático

Al iniciar la aplicación, esta se ejecuta en modo automático, en el cual se muestra directamente la medición de la conductividad.

En este modo, los botones de selección de intervalo permanecen deshabilitados, dado que el sistema determina de manera autónoma el intervalo de operación adecuado de acuerdo con el voltaje medido. Para ello, únicamente es necesario mantener los electrodos en la muestra evitando movimientos o variaciones, lo que garantiza la estabilidad de la señal.

Cabe señalar que, en modo automático, no es posible adquirir, borrar ni guardar datos. Sin embargo, en la interfaz se visualiza el intervalo seleccionado por el sistema, así como los valores de pendiente y ordenada correspondientes al ajuste realizado en dicho intervalo.

Ilustración 25: Modo automático. Conductividad



5. Modo calibración

Para acceder al modo de calibración basta con desactivar el botón de funcionamiento automático. Al hacerlo, se habilitan los botones de selección de intervalo, los de adquisición y guardado de datos, así como el indicador de corriente. En este modo es posible seleccionar el intervalo que se desea utilizar o calibrar y observar su respuesta en términos de corriente.

La calibración de un intervalo requiere el uso de muestras de conductividad conocida; se recomienda disponer de al menos tres muestras distintas. Dos mediciones siempre permiten trazar una recta, pero no son suficientes para comprobar la linealidad y correcto funcionamiento del acondicionador. En cambio, cuando al menos tres mediciones independientes se encuentran alineadas dentro de la misma gráfica, se obtiene evidencia suficiente para afirmar la calibración se ha realizado de forma correcta.

Ilustración 26: Modo calibración. Conductividad



6. Selección de intervalo

Para seleccionar el intervalo deseado basta con presionar el botón correspondiente. De manera casi inmediata, el indicador muestra el intervalo seleccionado, únicamente como confirmación de cuál se está utilizando. Asimismo, se actualizan los valores de pendiente y ordenada con los parámetros previamente guardados.

El indicador de corriente refleja de inmediato los resultados de la lectura. Es necesario esperar aproximadamente 5 segundos para que el valor se estabilice.

Ilustración 27: Selección de intervalo. Conductividad



7. Adquisición de puntos de calibración

Una vez seleccionado el intervalo que se desea calibrar, debe colocarse en el sensor una muestra de conductividad conocida. Es importante observar el indicador de corriente y esperar aproximadamente 5 segundos hasta que el valor se estabilice.

Se debe tener especial cuidado con los límites de medición para realizar una calibración adecuada.

- No se debe superar el valor mínimo (100), ya que operar en esa zona implica pérdida de resolución del ADC.
- No se debe superar el valor máximo (2500), pues al alcanzar este límite se produce saturación del acondicionador de señal.

En caso de llegar a estos límites, el sistema pierde confiabilidad en la medición. Por ello, se recomienda cambiar de intervalo si se alcanzan dichos valores.

Para adquirir un punto, una vez colocada la muestra conocida, es necesario introducir en la casilla indicada el valor de conductividad correspondiente. Cuando la corriente medida se ha estabilizado, se debe presionar el botón “adquirir punto”. Esto provoca que el par de datos se registren y aparezca representado como un punto en la gráfica.

Ilustración 28: Adquisición de puntos. Conductividad



Es necesario graficar al menos 2 puntos para generar una gráfica con pendiente y ordenada.

8. Guardar datos

Una vez que se ha obtenido la gráfica de calibración lineal, los datos correspondientes pueden guardarse en el acondicionador. Esto se logra al presionar el botón “Guardar”.

Al ejecutar esta acción, los valores de la pendiente y la ordenada de la recta de calibración se envían y almacenan en el dispositivo, además de actualizar el archivo de calibración asociado al intervalo seleccionado.

Posteriormente, se despliega un mensaje emergente de confirmación que indica que los datos fueron guardados correctamente, garantizando que la información de calibración ha quedado registrada en el acondicionador.

Ilustración 29: Guardar datos. Conductividad



Posteriormente, es posible regresar al modo automático para continuar con las mediciones regulares, o bien proceder con la calibración de otro intervalo según sea necesario.

9. Archivos de texto

Al ingresar al modo de calibración, se generan de forma automática archivos de texto correspondientes a los intervalos existentes. Estos archivos se crean dentro de una carpeta previamente definida en el sistema.

La estructura del nombre de los archivos sigue el formato:

“Estación_Rx”

Donde “Estación” corresponde a un número en formato hexadecimal y “x” identifica el intervalo asociado. De esta manera, cuando se realiza una calibración, los datos se guardan en el archivo correspondiente a la estación y al intervalo seleccionado.

Por ejemplo, si se utiliza la estación “AA” y se calibra el intervalo “1”, los datos actualizados de calibración se almacenan en el archivo: “AA_R1.txt”

Ilustración 30: Archivos de calibración. Conductividad

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
AA_R0	06/10/2025 01:48 ...	Documento de tex...	0 KB
AA_R1	06/10/2025 02:26 ...	Documento de tex...	1 KB
AA_R2	06/10/2025 02:36 ...	Documento de tex...	1 KB
AA_R3	06/10/2025 02:40 ...	Documento de tex...	1 KB

Todos los archivos generados contienen la información necesaria para documentar el proceso de calibración. La cabecera del documento está formada por los siguientes datos:

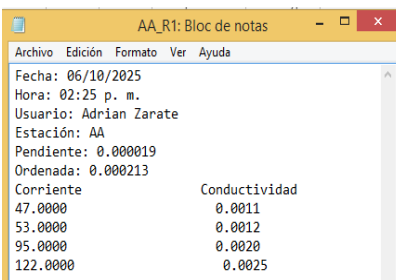
- Fecha de la calibración.
- Hora en que se realizó.
- Usuario que efectuó la calibración.
- Estación identificada en formato hexadecimal.

Posteriormente, se incluyen los puntos de corriente y conductividad graficados en el momento de la calibración, así como los valores de pendiente y ordenada obtenidos.

- El valor de conductividad corresponde al valor real de la muestra conocida.
- El valor de corriente corresponde al valor medido por el sensor.

El archivo generado se muestra a continuación:

Ilustración 31: Archivo de calibración. Conductividad



AA_R1: Bloc de notas	
Archivo Edición Formato Ver Ayuda	
Fecha: 06/10/2025	
Hora: 02:25 p. m.	
Usuario: Adrian Zarate	
Estación: AA	
Pendiente: 0.000019	
Ordenada: 0.000213	
Corriente	Conductividad
47.0000	0.0011
53.0000	0.0012
95.0000	0.0020
122.0000	0.0025

10. Detener el programa

Para terminar el uso del programa, se debe presionar el botón “Stop”. Al ejecutar esta acción, el sistema inicia el proceso de cierre, el cual tarda aproximadamente 3 segundos, y posteriormente se detiene de manera definitiva.

Ilustración 32: Detener programa. Conductividad



4.5 Pruebas de funcionamiento

Para evaluar el desempeño del acondicionador de señal se prepararon soluciones acuosas de NaCl con distintas molaridades, cubriendo un intervalo amplio de conductividades. La conductividad real de cada solución se determinó mediante un conductímetro, lo que permitió establecer valores de referencia para la comparación con las mediciones obtenidas por el sistema.

Ilustración 33: Acondicionador de conductividad y temperatura



Las muestras se almacenaron en botellas de plástico, dado que el objetivo del procedimiento no fue realizar un experimento con alta precisión metrológica, sino únicamente contar con un medio práctico y económico para conservar las soluciones durante las pruebas.

En este contexto, el propósito principal fue demostrar el funcionamiento del acondicionador de conductividad, más que obtener valores de conductividad con precisión absoluta.

Ilustración 34: Muestras de distinta molaridad



Los valores obtenidos mediante el conductímetro se emplearon como referencia para comparar las mediciones generadas por el acondicionador de señal.

Tabla 11: Conductividad de las muestras

Molaridad [M]	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
0.0001	4.14E-05
0.0002	5.08E-05
0.0005	9.59E-05
0.0007	1.22E-04
0.001	1.51E-04
0.002	2.37E-04
0.005	6.30E-04
0.007	8.24E-04
0.01	1.33E-03
0.02	2.13E-03
0.05	5.27E-03
0.07	7.56E-03
0.1	1.00E-02
0.2	1.73E-02

En una primera etapa se empleó una celda experimental diseñada con el objetivo de aproximar un área efectiva de 1 cm^2 . Como punto de partida, se utilizaron tubos de acero inoxidable de distintos diámetros para conformar los electrodos, lo que permitió observar el comportamiento inicial del acondicionador de señal bajo condiciones prácticas.

Ilustración 35: Celda de conductividad



Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 12: Resultados de conductividad. Celda 1

Molaridad [M]	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	IP [V]		
		Intervalo 0	Intervalo 1	Intervalo 2
0.0001	4.14E-05			0.502
0.0002	5.08E-05			0.618
0.0005	9.59E-05			1.188
0.0007	1.22E-04			1.472
0.002	2.37E-04		0.322	
0.005	6.30E-04		0.62	
0.007	8.24E-04		0.774	
0.01	1.33E-03		1.036	
0.02	2.13E-03		1.52	
0.05	5.27E-03	0.2		
0.07	7.56E-03	0.24		
0.1	1.00E-02	0.3		
0.2	1.73E-02	0.42		

Las respuestas de cada intervalo se pueden observar de forma más clara en las siguientes gráficas:

Ilustración 36: Gráfica intervalo 0. Conductividad

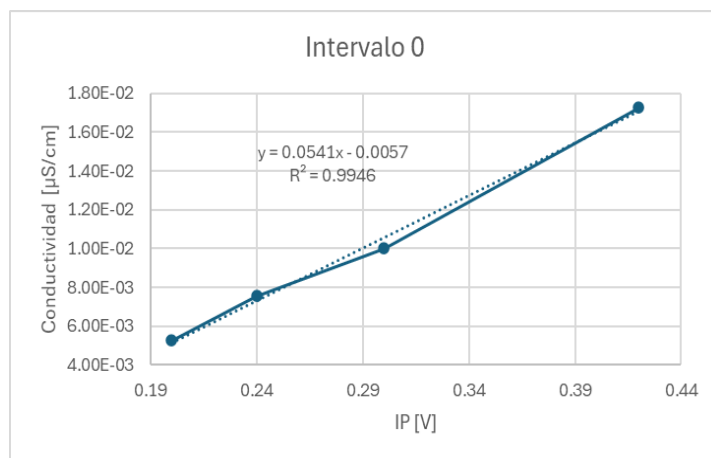


Ilustración 37: Gráfica intervalo 1. Conductividad

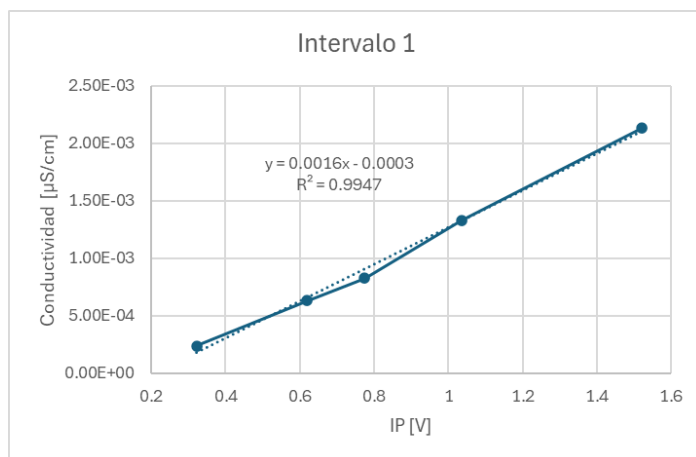
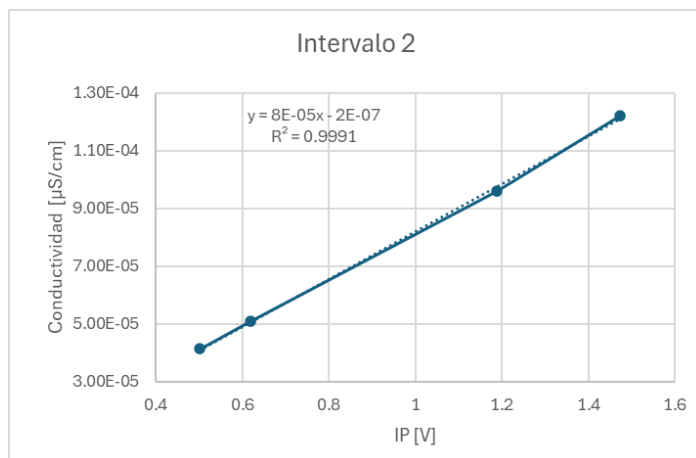


Ilustración 38: Gráfica intervalo 2. Conductividad



En las gráficas se aprecia que la relación entre la conductividad medida y la señal procesada por el acondicionador presenta un comportamiento lineal. Este resultado confirma que el acondicionador reproduce de manera consistente la tendencia esperada.

En todos los casos, el ajuste mediante un modelo lineal mostró un coeficiente de determinación (R^2) elevado, lo que indica que la variabilidad de los datos está explicada casi en su totalidad por la recta de ajuste.

En consecuencia, el error asociado a la medición es mínimo y el sistema puede representarse adecuadamente mediante la ecuación $y = mx + b$, tal como se había previsto.

Con estos resultados es posible calcular las constantes de la celda, se hace uso de la ecuación:

$$\sigma = \frac{IP * K}{-Vi * Rf}$$

Despejando K:

$$K = \frac{\sigma * Vi * Rf}{IP}$$

Realizando los cálculos para cada caso se obtienen los siguientes valores:

K0[cm ⁻¹]	K1[cm ⁻¹]	K2[cm ⁻¹]
0.331	0.110	0.082

Con la intención de entender mejor el comportamiento del acondicionador, se realizaron mediciones utilizando la celda incluida en el conductímetro antes utilizado.

Ilustración 39: Celda de conductímetro



Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 13: Resultados conductividad. Celda conductímetro

Molaridad [M]	Conductividad [μS/cm]	IP [V]		
		Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
0.0001	4.14E-05			0.238
0.0002	5.08E-05			0.24
0.0005	9.59E-05			0.46
0.0007	1.22E-04			0.534
0.001	1.51E-04			0.81
0.002	2.37E-04			1.218
0.005	6.30E-04		0.28	3.08
0.007	8.24E-04		0.366	3.98
0.01	1.33E-03		0.602	
0.02	2.13E-03		0.95	
0.05	5.27E-03		2.64	
0.07	7.56E-03	0.32	3.38	
0.1	1.00E-02	0.432	4.34	
0.2	1.73E-02	0.794		

Las siguientes gráficas muestran los datos de forma más clara:

Ilustración 40: Gráfica intervalo 1. Conductividad

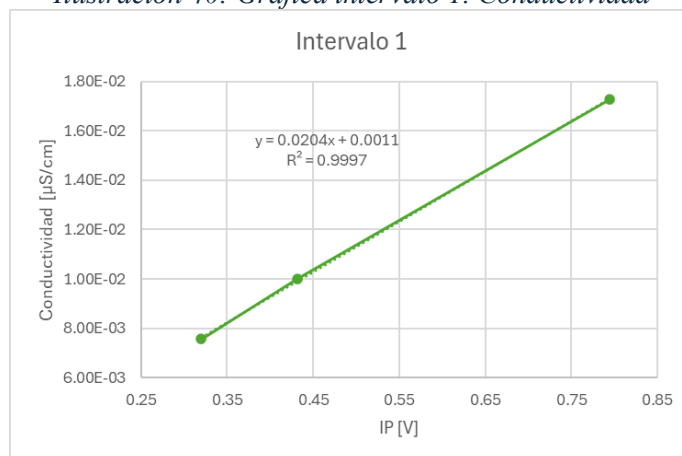


Ilustración 41: Gráfica intervalo 2. Conductividad

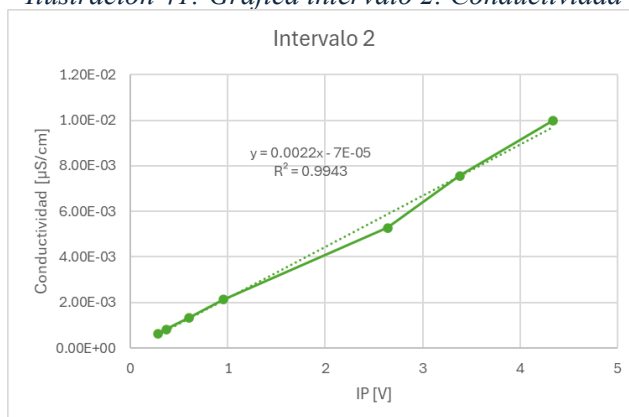
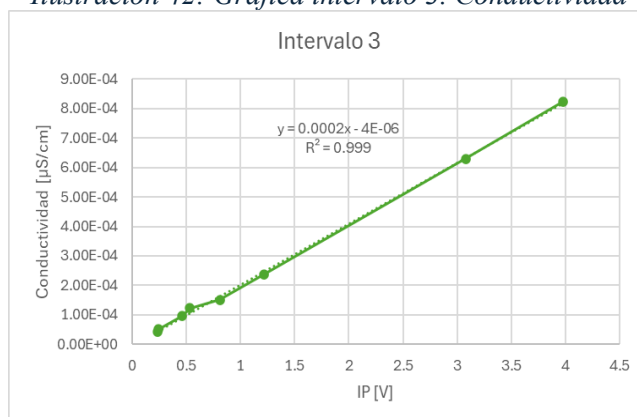


Ilustración 42: Gráfica intervalo 3. Conductividad



El comportamiento observado resulta similar al caso anterior, ya que los datos pueden representarse adecuadamente mediante modelos lineales y el error asociado a la medición es mínimo en todos los intervalos analizados. No obstante, al emplear esta celda se modificaron los intervalos de trabajo respecto al caso previo, utilizando en este caso los rangos superiores de conductividad.

Como consecuencia, al calcular las constantes de celda (K) se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 14: Valores calculados de K

K1	K2	K3
2.284	2.213	2.018

Los valores calculados para la constante de celda resultaron considerablemente más altos que en el caso anterior. El promedio de los valores anteriores fue aproximadamente $K = 0.174$, mientras que el promedio de los nuevos valores alcanzó $K = 2.172$. Esto representa un incremento cercano al 1150 %, lo que evidencia la influencia de la geometría de la celda en el valor de la constante. Dicho aumento confirma que la modificación en el área y la distancia entre electrodos tiene un impacto significativo en el comportamiento del acondicionador.

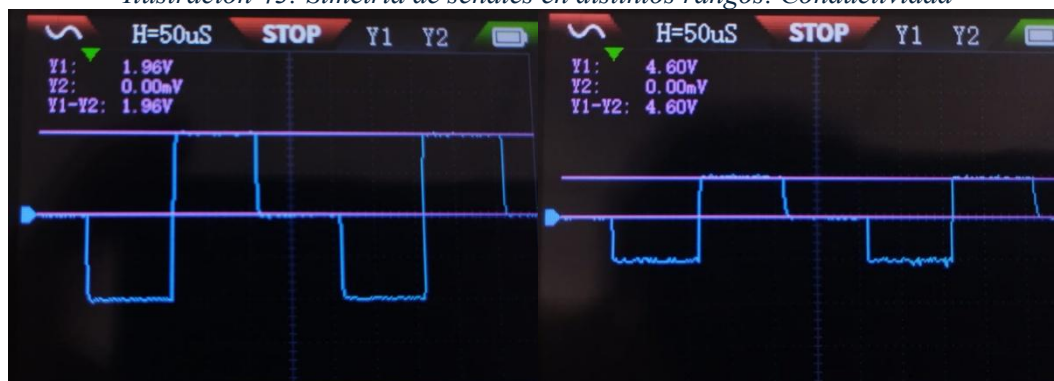
Los valores calculados para la constante de celda resultaron considerablemente más altos que en el caso anterior. Aunque en ambos escenarios se obtuvieron mediciones confiables, es fundamental comprender el efecto que produce la variación de K . Como se mostró previamente en la tabla 14, los intervalos 0 y 1 corresponden a las condiciones de mayor consumo de corriente. Si bien se realizaron los cálculos necesarios para no exceder la corriente máxima suministrada por el amplificador, es recomendable evitar dichos intervalos, lo cual puede lograrse mediante un ajuste adecuado de la constante de celda.

De acuerdo con la relación $I_o = V_o/R_f$, un incremento en el voltaje de salida (V_o) provoca un aumento proporcional en la corriente de salida (I_o). Por ello, resulta conveniente mantener V_o en valores bajos. A su vez, la ecuación $V_o = \sigma/K$ muestra que al incrementar K , el voltaje de salida disminuye, dado que ambas magnitudes son inversamente proporcionales.

En consecuencia, se concluye que es preferible utilizar constantes de celda con valores elevados (del orden de 1 a 2), ya que esto facilita operar en intervalos de medición que demandan menor corriente. Finalmente, considerando la expresión $K = l/A$, se observa que es posible aumentar K reduciendo el área de los electrodos y/o incrementando la distancia entre ellos.

Tras realizar múltiples mediciones y analizar en el osciloscopio las señales registradas, se observó que en todos los casos la amplitud es idéntica en el semiciclo positivo y en el semiciclo negativo, diferenciándose únicamente por el signo. En consecuencia, la señal obtenida presenta simetría respecto al eje horizontal en todos los casos.

Ilustración 43: Simetría de señales en distintos rangos. Conductividad

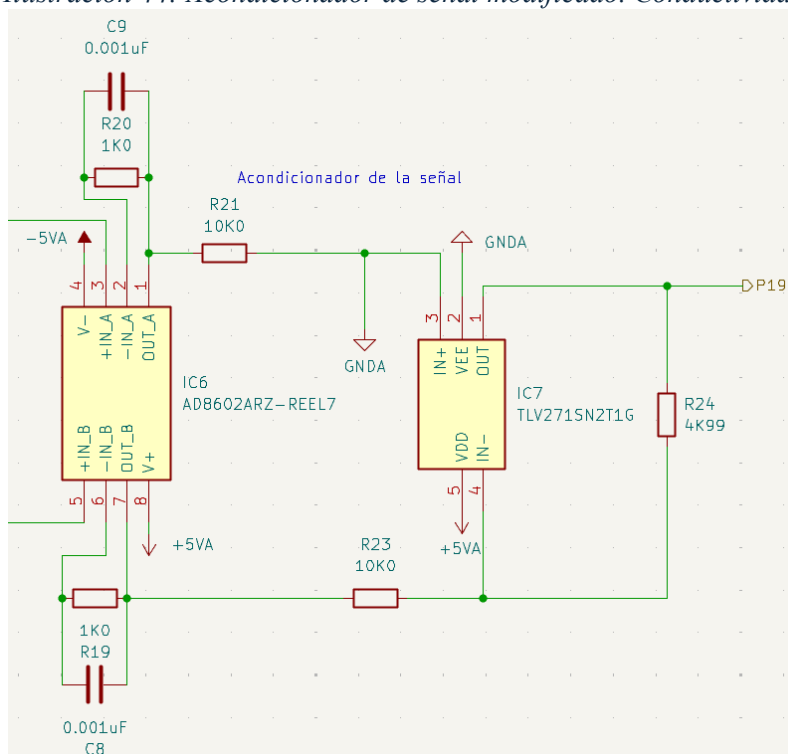


A partir de la simetría observada en la señal, se determinó que medir ambos semiciclos resulta innecesario. Para confirmar esta hipótesis se realizaron pruebas adicionales. En el amplificador diferencial encargado de entregar el voltaje final, la entrada no inversora se conectó a tierra con el propósito de anular el semiciclo positivo.

Bajo esta configuración, el amplificador diferencial opera como un amplificador inversor con una ganancia de 0.5, de modo que el semiciclo negativo se transforma en un voltaje positivo con la mitad de la amplitud original.

El circuito modificado se muestra en la siguiente imagen:

Ilustración 44: Acondicionador de señal modificado. Conductividad



Al repetir las mediciones se confirmó que el acondicionador mantiene un comportamiento adecuado. Los voltajes obtenidos corresponden a los previamente registrados, aunque con una amplitud reducida a la mitad. No obstante, la respuesta del sistema conserva su carácter lineal.

A continuación, se muestran los datos obtenidos con la celda perteneciente al acondicionador:

Tabla 15: Resultados conductividad. Celda conductímetro. Circuito modificado

Molaridad [M]	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	IP [V]		
		Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 3
0.0001	4.14E-05			0.119
0.0002	5.08E-05			0.12
0.0005	9.59E-05			0.23
0.0007	1.22E-04			0.267
0.001	1.51E-04			0.405
0.002	2.37E-04			0.609
0.005	6.30E-04		0.14	1.54
0.007	8.24E-04		0.183	1.99
0.01	1.33E-03		0.301	
0.02	2.13E-03		0.475	
0.05	5.27E-03		1.32	
0.07	7.56E-03	0.16	1.69	
0.1	1.00E-02	0.216	2.17	
0.2	1.73E-02	0.397		

Los resultados se pueden observar de forma más clara en las siguientes gráficas:

Ilustración 45: Gráfica intervalo 1 [modificado]. Conductividad

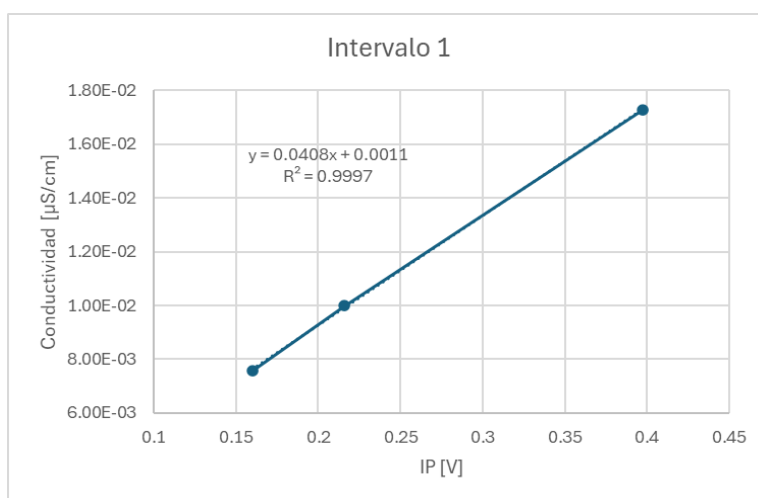


Ilustración 46: Gráfica intervalo 2 [modificado]. Conductividad

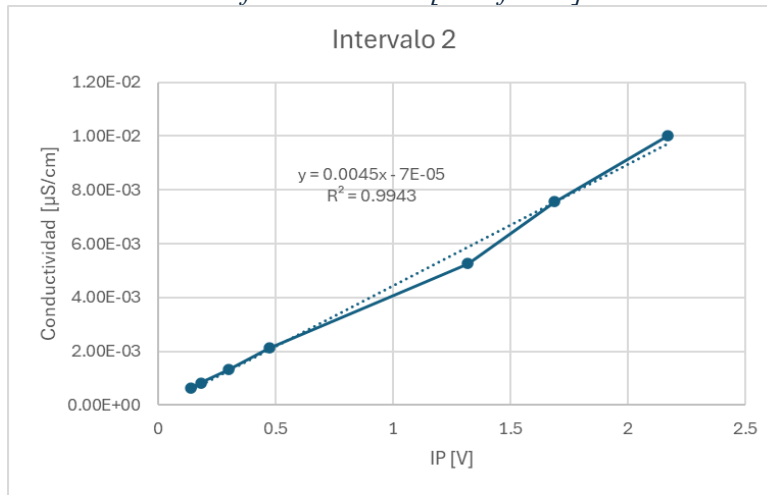
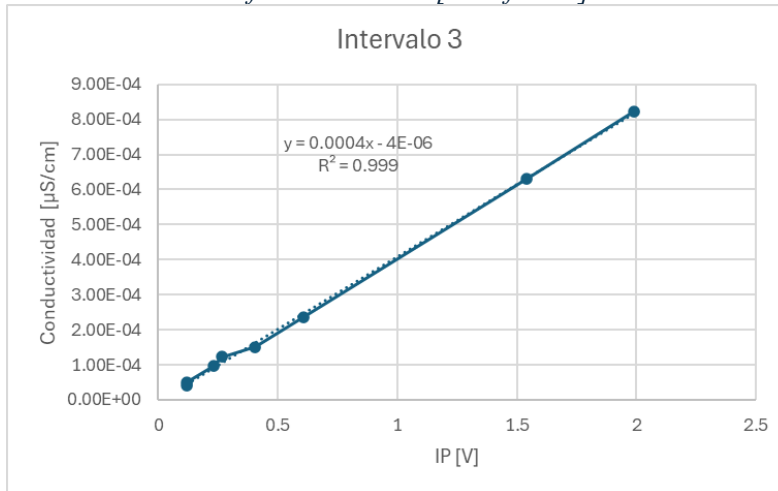


Ilustración 47: Gráfica intervalo 3 [modificado]. Conductividad



Los valores de la constante de celda (K), calculados conforme al procedimiento previamente descrito, se obtuvieron para cada intervalo de medición y se presentan a continuación:

K1	K2	K3
4.568	4.426	4.037

De acuerdo con la relación mostrada, cuando la corriente de salida se reduce a la mitad, el valor de la constante de celda (K) aumenta aproximadamente al doble. Este resultado valida la coherencia entre la configuración del amplificador y la magnitud de las mediciones, confirmando que la variación de K está directamente vinculada con el ajuste de la corriente y el voltaje en el sistema.

En conclusión, para futuras mejoras del acondicionador es factible simplificar el circuito de medición, dado que no resulta necesario registrar ambos semiciclos para garantizar su correcto funcionamiento. Lo esencial es mantener la generación de un voltaje de excitación bipolar, condición indispensable para prevenir el fenómeno de electrólisis previamente explicado.

5 Módulo de temperatura

5.1 Principio de funcionamiento

Para la medición de la temperatura se emplea el sensor analógico “MCP9700A”, el cual convierte la temperatura en una señal de voltaje lineal. Este dispositivo permite medir en un rango de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$ y se alimenta con tensiones comprendidas entre 2.3 V y 5.5 V. Presenta una sensibilidad de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ y un offset de salida de 500 mV a 0°C . La ecuación que describe el voltaje de salida del sensor es:

$$V_o = 10\text{mV} * T[^{\circ}\text{C}] + 500\text{mV} \quad (12)$$

En el contexto de esta investigación, orientada a la instrumentación en lagunas, el intervalo de interés se restringe de 0°C a 40°C , rango que corresponde a los límites de temperatura que puede alcanzar el agua en estado líquido.

La lectura directa de la salida del sensor mediante el ADC del microcontrolador presenta un rango utilizable limitado, por lo que resulta necesario amplificar la señal. Para ello se emplea un amplificador operacional “LMV321” en configuración no inversora, con una ganancia de 2. Este dispositivo, de bajo consumo y riel a riel, se alimenta típicamente a 5 V. La ecuación de salida del sistema queda expresada como:

$$V_o = 2 (10\text{mV} * T[^{\circ}\text{C}] + 500\text{mV})$$

El voltaje medido por el ADC se relaciona con el valor digital obtenido mediante:

$$V_{ADC} = N \left(\frac{V_{ref}}{N_{bits}} \right)$$

donde N es el valor digital, V_{REF} el voltaje de referencia y N_{bits} el número de niveles del convertidor.

Sustituyendo en la ecuación, se obtiene la relación entre el valor digital y el voltaje medido:

$$V_{ADC} = N \left(\frac{4.096}{4096} \right) = N(1\text{ mV})$$

Para determinar la ecuación que calcula la temperatura:

$$N * 1\text{ mV} = 2 (10\text{ mV} * T + 500\text{ mV})$$

Despejando la temperatura:

$$T = \frac{(N * 1\text{ mV}) - 1\text{V}}{20\text{ mV}}$$

$$T[^{\circ}\text{C}] = N * 0.05 - 50 \quad (13)$$

La resolución puede calcularse considerando el intervalo de voltaje de salida del amplificador en el rango de interés:

- A $0^{\circ}\text{C} \rightarrow V_o = 1\text{ V}$
- A $40^{\circ}\text{C} \rightarrow V_o = 1.8\text{ V}$

El ADC registra aproximadamente 1000 niveles a 0°C y 1800 niveles a 40°C , lo que implica una diferencia de 800 niveles. Por tanto, la resolución es:

$$\text{Resolución} = \frac{40^{\circ}\text{C}}{800 \text{ niveles}} = 0.05^{\circ}\text{C/nivel}$$

Este resultado demuestra que el sistema ofrece una resolución óptima, capaz de detectar variaciones muy pequeñas de temperatura dentro del rango de operación definido.

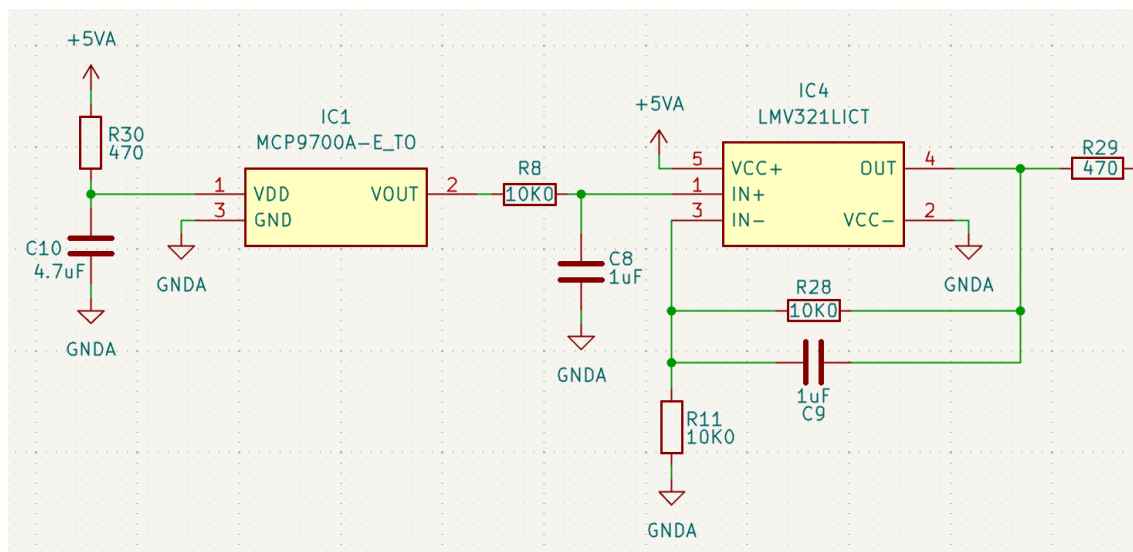
Sin embargo, para la aplicación propuesta únicamente se requiere una resolución de 0.1°C , por lo que el circuito diseñado resulta más que adecuado.

5.2 Diseño del circuito

Este acondicionador se integró en el mismo módulo que el de conductividad, por lo que ambos comparten la misma fuente de alimentación, el sistema de comunicaciones y el microcontrolador.

Este acondicionador no requiere un número elevado de componentes. En primera instancia se incorpora un filtro RC en la línea de alimentación del sensor de temperatura, cuya función es atenuar el ruido presente en la fuente de energía. Este filtro elimina principalmente las componentes de alta frecuencia, garantizando que el sensor reciba una tensión estable y libre de perturbaciones, lo que se traduce en mediciones más confiables.

Ilustración 48: Acondicionador de temperatura



Después de la salida del sensor se incorpora un filtro RC, cuya función es depurar la señal entregada y obtener una respuesta más limpia y estable. Este filtro atenúa principalmente el ruido de alta frecuencia, mejorando la calidad de la señal antes de su procesamiento.

Posteriormente, la señal se aplica a un amplificador operacional “LMV321” en configuración no inversora, cuya ecuación de salida se expresa como:

$$V_o = V_i \left(1 + \frac{R_f}{R} \right)$$

Se utilizaron resistencias de 10 kΩ, de forma que la ganancia es:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 1 + 1$$

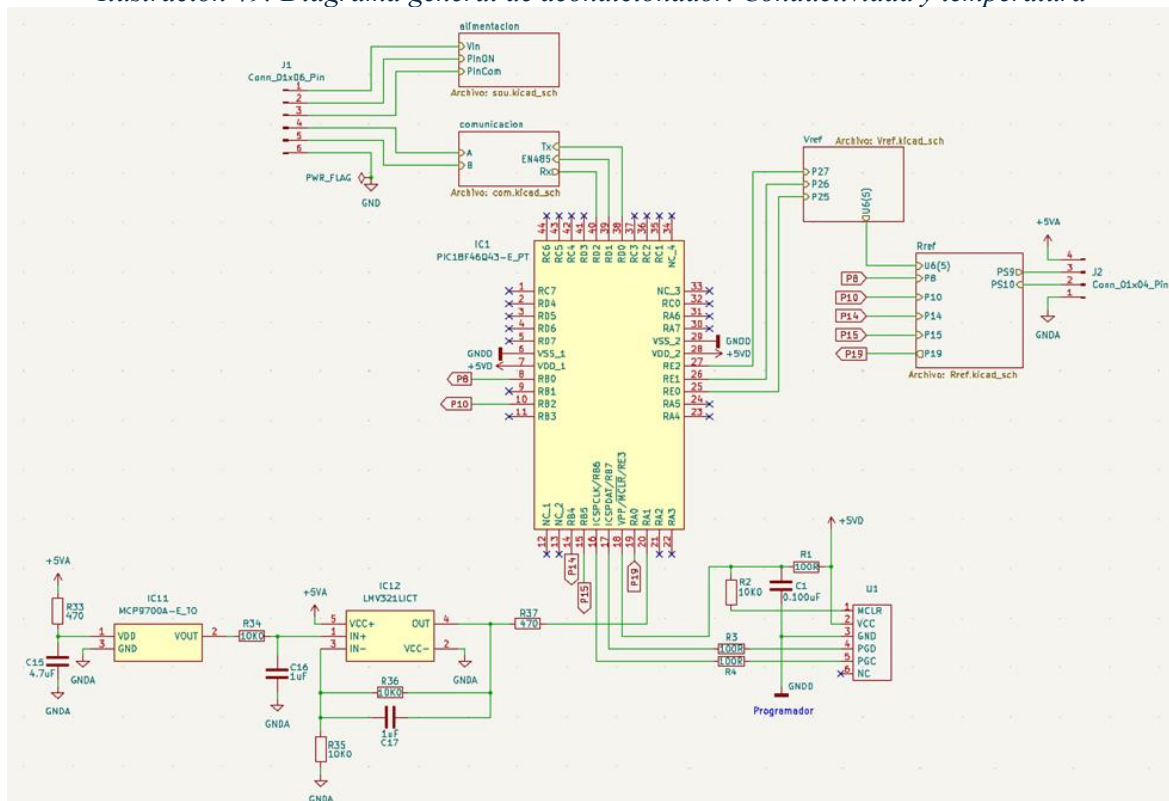
$$\therefore \frac{V_o}{V_i} = 2$$

Finalmente, se incorpora una resistencia en serie con la salida del amplificador, cuya función es proteger al microcontrolador en caso de sobre corriente o de una posible falla del sensor. Este elemento actúa como limitador de corriente, evitando daños en la etapa de adquisición.

5.3 Programación

El microcontrolador encargado de la medición de temperatura es el mismo que gestiona el acondicionador de conductividad; en consecuencia, ambos comparten la configuración de la comunicación serial y la lógica de interpretación de comandos.

Ilustración 49: Diagrama general de acondicionador. Conductividad y temperatura



Para obtener la señal analógica proveniente del circuito previamente descrito, es necesario habilitar un canal adicional del conversor analógico-digital (ADC), de modo que pueda procesar dicho valor. En este caso, la terminal RA1 se configura como entrada analógica.

Tabla 16: Terminal utilizada. Temperatura

Terminal física	Nombre de terminal	Periférico	Función	Dirección	Nombre asignado
20	RA1	ADCC	ANx	Input	Temp

Se añaden algunos comandos para realizar la calibración y para obtener los valores de temperatura y voltaje:

Tabla 17: Comandos sin argumentos. Temperatura

COMANDOS SIN ARGUMENTOS				
Estación	Separador	Comando		Terminador
CONXX	ESPACIO	XX		LF
XX (00 a FE) FF es para cambio de identificador	20 _H	TP	Regresa temperatura	0A _H
		07	Regresa promedio de voltaje	
		08	Regresa datos de calibración (m, b)	

Tabla 18: Respuesta comandos. Temperatura

RESPUESTA COMANDOS TP Y 07			
Estación	Separador	Conductividad, voltaje o temperatura	Terminador
CONXX	Espacio	FF.FFFF	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador	20 _H	Flotante con 4 decimales	0A _H

Tabla 19: Respuesta comando 08. Temperatura

RESPUESTA COMANDO 08					
Estación	Separador	m	Separador	b	Terminador
CONXX	Espacio	FF.FFFF	Espacio	FF.FFFF	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador	20 _H	Flotante con 4 decimales	20 _H	Flotante con 4 decimales	0A _H

Tabla 20: Comandos con argumentos. Temperatura

COMANDOS CON ARGUMENTOS					
Estación	Separador	Comando	Separador	Argumento	Terminador
CONXX	ESPACIO	XX	NULO		LF
XX (00 a FE) Si XX=FF llamada general solo aplica al cambio de estación	20 _H	05 Pendiente 06 Ordenada 05 Estación	20 _H	Pendiente y ordenada Flotantes Estación 00 a FE Hexadecimal	0A _H

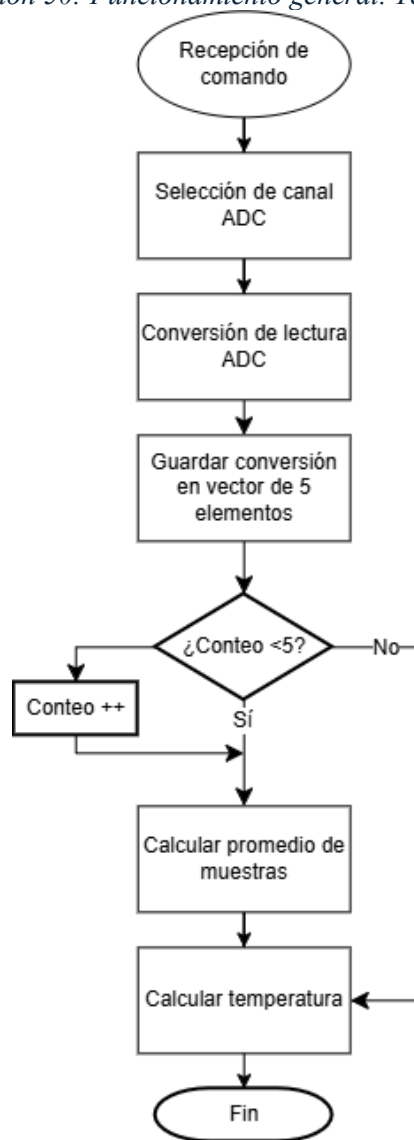
Tabla 21: Respuesta comandos con argumentos. Temperatura

RESPUESTA COMANDOS CON ARGUMENTOS							
Estación	Separador	Número de serie	Separador	Pendiente	Separador	Ordenada	Terminador
CONXX	Espacio	XXXX	Espacio	FF.FFFF	Espacio	FF.FFFF	LF
XX (00 a FE) Si se cambio la estación responde con el nuevo identificador	20 _H	Hexadecimal 4 dígitos	20 _H	Flotante, si se cambio envia la nueva pendiente de lo contrario la anterior	20 _H	Flotante, si se cambio envía la nueva ordenada de lo contrario la anterior	0A _H

El proceso completo de muestreo se describe a continuación y se representa en el diagrama de flujo.

Una vez recibido el comando, se inicia la rutina de muestreo. En primer lugar, se selecciona el canal correspondiente del conversor analógico - digital y, posteriormente, se procede a la conversión de la señal.

Ilustración 50: Funcionamiento general. Temperatura



Además de registrar la conversión del canal del conversor ADC, el valor obtenido se almacena en un vector de cinco elementos, con el propósito de calcular un promedio móvil basado en las últimas cinco lecturas. Esta técnica permite obtener resultados más estables y reducir el efecto del ruido en la señal.

Una vez determinado el promedio de las muestras, el paso final consiste en calcular la temperatura mediante la ecuación previamente establecida:

$$T[^\circ\text{C}] = N * 0.05 - 50$$

donde N representa el valor promedio de lectura del ADC.

El resultado de esta operación corresponde al valor de la temperatura que lee el acondicionador y se entrega como respuesta al comando.

5.4 Desarrollo de la aplicación

La aplicación desarrollada permite calibrar el acondicionador de temperatura. Con esta herramienta es posible recuperar las constantes de calibración previamente utilizadas, así como generar nuevas a partir de muestras conocidas de temperatura o de voltaje proporcional.

Es importante señalar que la comunicación entre el acondicionador y el sistema se establece inicialmente mediante USB. Sin embargo, dado que el acondicionador opera bajo el protocolo RS-485, se requiere un módulo de conversión que adapte el formato de USB a RS-485.

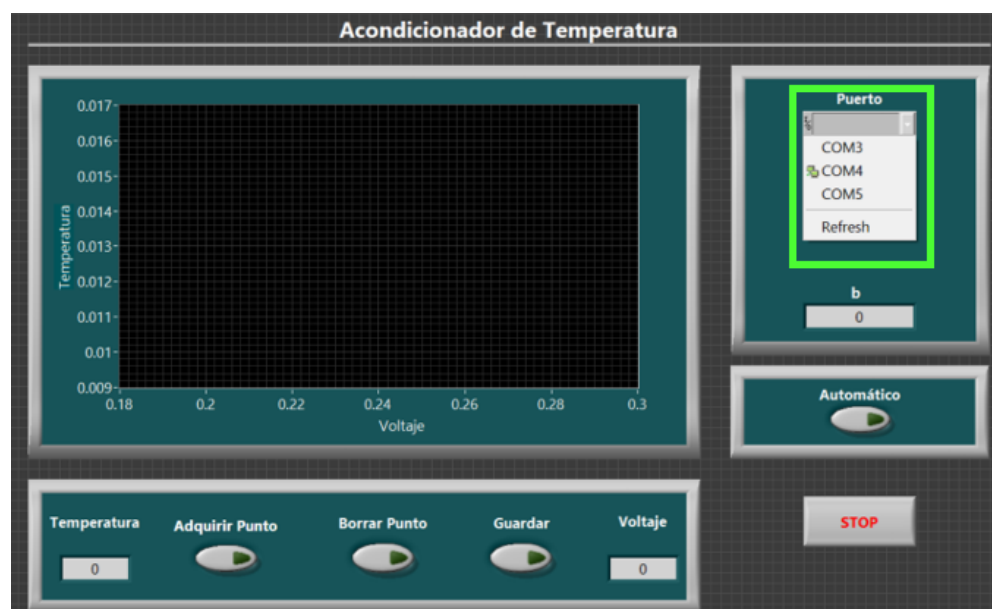
La aplicación está compuesta únicamente por una pantalla principal, desde la cual se pueden realizar mediciones para comprobar el funcionamiento del acondicionador. En caso de ser necesario, también permite efectuar la calibración mediante graficando puntos de voltaje y temperatura, con el fin de obtener la pendiente y la ordenada requeridas.

A continuación, se describen los pasos recomendados para su correcto uso.

1. Configurar puerto de comunicación USB

Una vez que el acondicionador está conectado mediante un cable USB, es necesario seleccionar en la aplicación el puerto COM correspondiente donde se encuentra conectado.

Ilustración 51: Selección de puerto. Temperatura



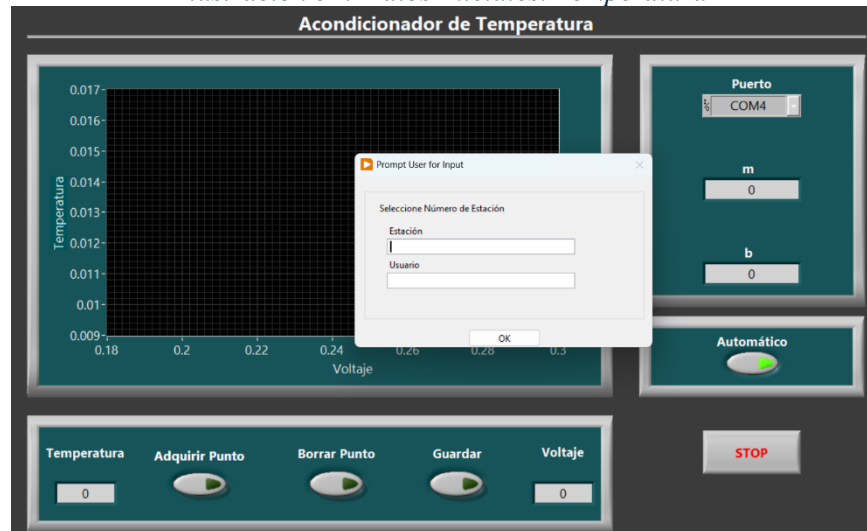
2. Inicio de la aplicación

Para iniciar el programa, únicamente se debe ejecutar la aplicación con el nombre “Temp_Completo”.

3. Llenar datos iniciales

Al ejecutar la aplicación, aparece una ventana en la que se solicita el número de estación a la que se desea escribir. Asimismo, se requiere ingresar el nombre del usuario encargado de calibrar el sensor, con la finalidad de registrar esta información en los archivos de texto generados.

Ilustración 52: Datos Iniciales. Temperatura



4. Modo Automático

Al iniciar, el programa iniciara en modo automático, donde se puede obtener el valor de la temperatura de forma automática, también se muestran las constantes de calibración que se están utilizando para obtener los valores actuales.

Ilustración 53: Modo automático. Temperatura



5. Modo Calibración

Para comenzar el proceso de calibración únicamente se tiene que desactivar el botón “Automático”, enseguida los botones de “adquirir punto”, “borrar punto”, “guardar” y el indicador de “voltaje” se activan obtener nuevas constantes de calibración.

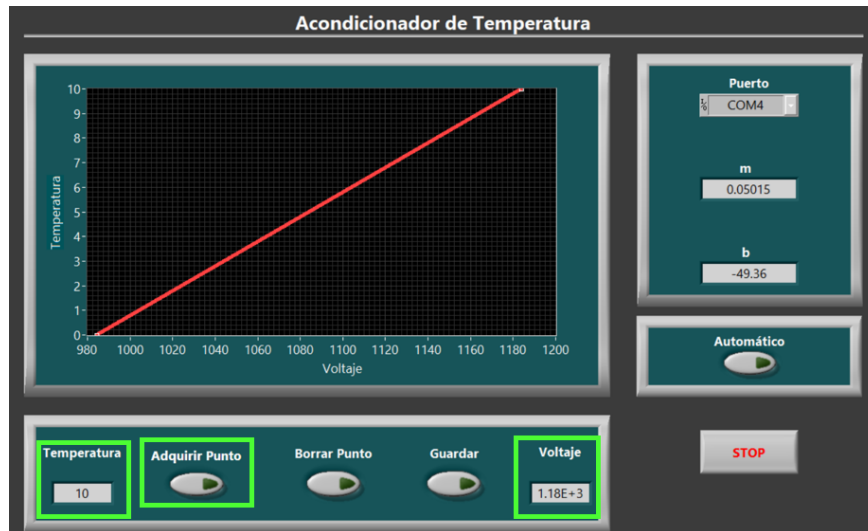
6. Introducir el valor de temperatura que se está utilizando o simulando

Una vez que se está seguro de que el valor de voltaje es estable, puede introducirse el valor de la muestra de temperatura que se está utilizando o simulando, para comenzar a establecer la relación y las variables de calibración.

7. Presionar el botón “adquirir punto”

Al presionar el botón se grafica el primer punto, que representa la respuesta en voltaje correspondiente al nivel de temperatura indicado.

Ilustración 54: Adquisición de puntos. Temperatura



Este paso se puede repetir las veces que sea necesario. Para obtener valores de pendiente y ordenada se requieren al menos dos puntos, sin embargo, se considera que entre más puntos existan, mayor será la exactitud del cálculo.

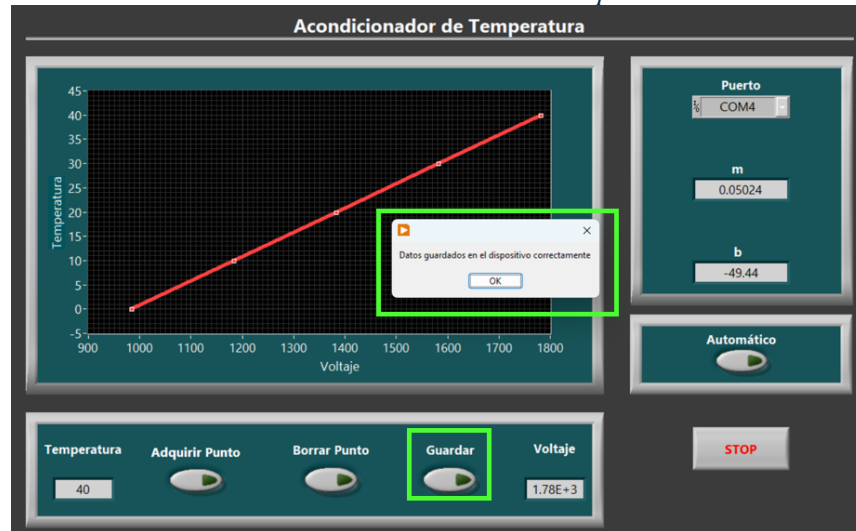
También se puede presionar el botón “borrar” para eliminar el último punto de la gráfica en caso de ser necesario.

8. Guardar datos

Una vez que se hayan graficado el número de puntos deseados y se considere que la respuesta es la esperada (lineal), los datos pueden almacenarse para calibrar el sensor.

Al presionar el botón “Guardar”, casi de manera inmediata se desplegará un mensaje que indica que los valores de la pendiente y la ordenada se almacenaron correctamente.

Ilustración 55: Guardar datos. Temperatura



Al mismo tiempo que se guardan las constantes de calibración en el acondicionador, se crea o actualiza un archivo de texto. La estructura del nombre de los archivos sigue el formato: **“TEMP_Estación”**

donde *Estación* corresponde a un número en formato hexadecimal.

Por ejemplo, si se utiliza la estación “AA” y se calibra, el archivo de texto tendrá el nombre **“TEMP_AA.txt”**.

Los archivos de texto incluyen como cabecera los siguientes datos:

- Fecha
- Hora
- Usuario
- Número de serie del microcontrolador

Además, se muestran los valores de la pendiente y la ordenada, así como los puntos de voltaje frente a la temperatura que se utilizaron para calibrar el acondicionador.

A continuación, se presenta un ejemplo de archivo de texto:

Ilustración 56: Archivo de calibración. Temperatura

```

TEMP_AA.txt
Archivo  Editar  Ver

Fecha: 26/08/2026
Hora: 12:26 p. m.
Usuario: AZB
Estación: AA
Pendiente: 0.0502360823
Ordenada: -49.4443487604
Voltaje      Temp
1780.5999    40.0000000000
1581.4000    30.0000000000
1382.0000    20.0000000000
1183.5999    10.0000000000
984.2000     0.0000000000
    
```

9. Detener el programa

Para terminar el uso del programa, se debe presionar el botón “Terminar”. Al ejecutar esta acción, el sistema inicia el proceso de cierre, el cual tarda aproximadamente 1 segundo, y posteriormente se detiene de manera definitiva.

5.5 Pruebas de funcionamiento

Para evaluar el desempeño del acondicionador de temperatura se empleó un calibrador de procesos como sustituto del sensor, considerando que el sensor funciona correctamente. Esta metodología se utiliza exclusivamente para verificar la correcta operación de la electrónica interna del sistema.

El calibrador de procesos actúa como una fuente de voltaje altamente precisa, capaz de generar señales controladas que simulan la respuesta del sensor real. De esta manera, es posible reproducir las condiciones de operación y comprobar que el acondicionador interpreta adecuadamente los valores de entrada, garantizando la confiabilidad del circuito sin necesidad de recurrir al sensor físico durante las pruebas iniciales.

Recordando la ecuación de salida del sensor:

$$V_o = 10 \text{ mV} * T[^\circ\text{C}] + 500 \text{ mV}$$

Se realizan los cálculos para simular distintas temperaturas:

Tabla 22: Cálculos para simulación de voltaje. Temperatura

Temperatura [°C]	Voltaje [mV]
0	500
5	550
10	600
15	650
20	700
25	750
30	800
35	850
40	900

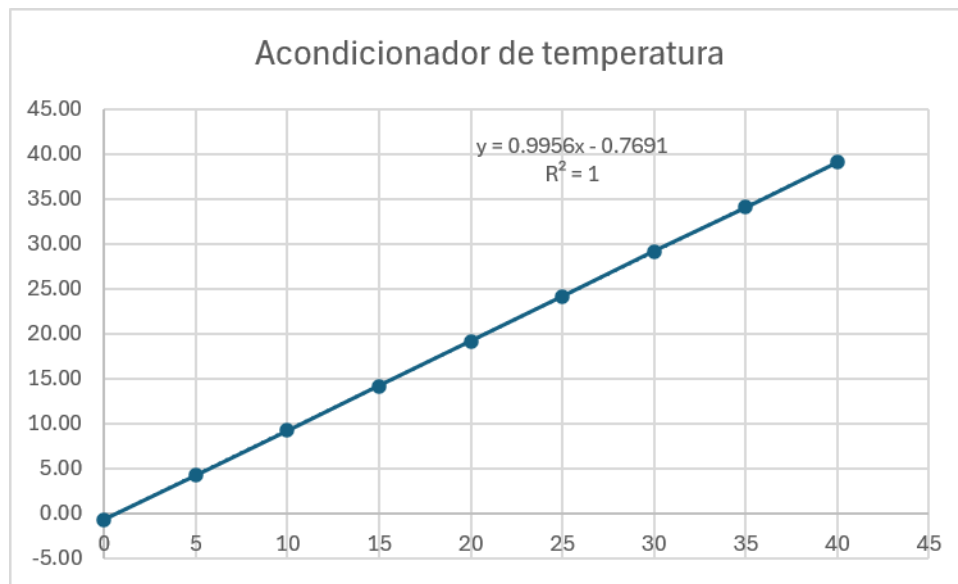
Con los voltajes generados mediante el calibrador de procesos fue posible obtener las mediciones correspondientes del acondicionador de temperatura previamente calibrado. Dichos valores se presentan a continuación:

Tabla 23: Pruebas acondicionador temperatura

Temperatura [°C]	
Simulada	Medida
0	0
5	5
10	10.01
15	14.99
20	19.98
25	24.99
30	29.99
35	35
40	40

Se puede observar que los valores medidos son prácticamente iguales a los valores esperados y que el porcentaje de error es prácticamente nulo. A continuación, se muestra la gráfica de los datos, donde se observa la linealidad del sistema.

Ilustración 57: Gráfica de resultados. Temperatura



Con los datos obtenidos se confirma que el acondicionador de temperatura cumple correctamente con su función, ya que las mediciones realizadas coinciden con los valores teóricos esperados. Además, el diseño implementado presenta la ventaja de ser versátil, pues puede integrarse con cualquier sensor de temperatura que posea características eléctricas similares, garantizando así la compatibilidad con distintos sensores. Incluso si existiera variación, se puede realizar el proceso de calibración como ya se demostró.

6 Módulo de pH

6.1 Principio de funcionamiento

Para la medición de pH se emplean electrodos diseñados para determinar la acidez o alcalinidad de soluciones líquidas en un rango típico de 0 a 14 unidades de pH, los cuales generan un voltaje proporcional. Este acondicionador está diseñado de manera que puede utilizarse con prácticamente cualquier electrodo estándar.

Ilustración 58: Sensor de pH



En este caso se emplea el electrodo E201-BNC, el cual genera una salida de voltaje proporcional al valor de pH, con un intervalo aproximado de ± 414 mV. Para mantener un margen de medición adecuado, se considera un intervalo de ± 500 mV.

No obstante, es importante señalar que la señal de voltaje entregada por el electrodo presenta una impedancia extremadamente alta, del orden de los gigaohmios ($G\Omega$), por lo que no puede ser medida directamente por el ADC de un microcontrolador.

Es necesario acondicionar la señal antes de ser medida. Para ello se emplea un amplificador no inversor con una ganancia de 2, lo que permite obtener un intervalo más adecuado para la medición, de aproximadamente ± 1 V. Se utiliza un amplificador con características especiales, cuya descripción se presentará más adelante.

A pesar de que la señal ya es medible, sigue siendo una señal bipolar; sin embargo, el ADC no puede registrar voltajes negativos. Por ello, es necesario añadir una etapa al circuito con la finalidad de incorporar un *offset*. Esto se logra mediante un amplificador diferencial con ganancia unitaria.

Esto permite añadir un *offset* a la señal previamente obtenida, generando un nuevo intervalo de medición de 0V a 2V. De esta manera, ahora es posible registrar dicho intervalo con el ADC del microcontrolador.

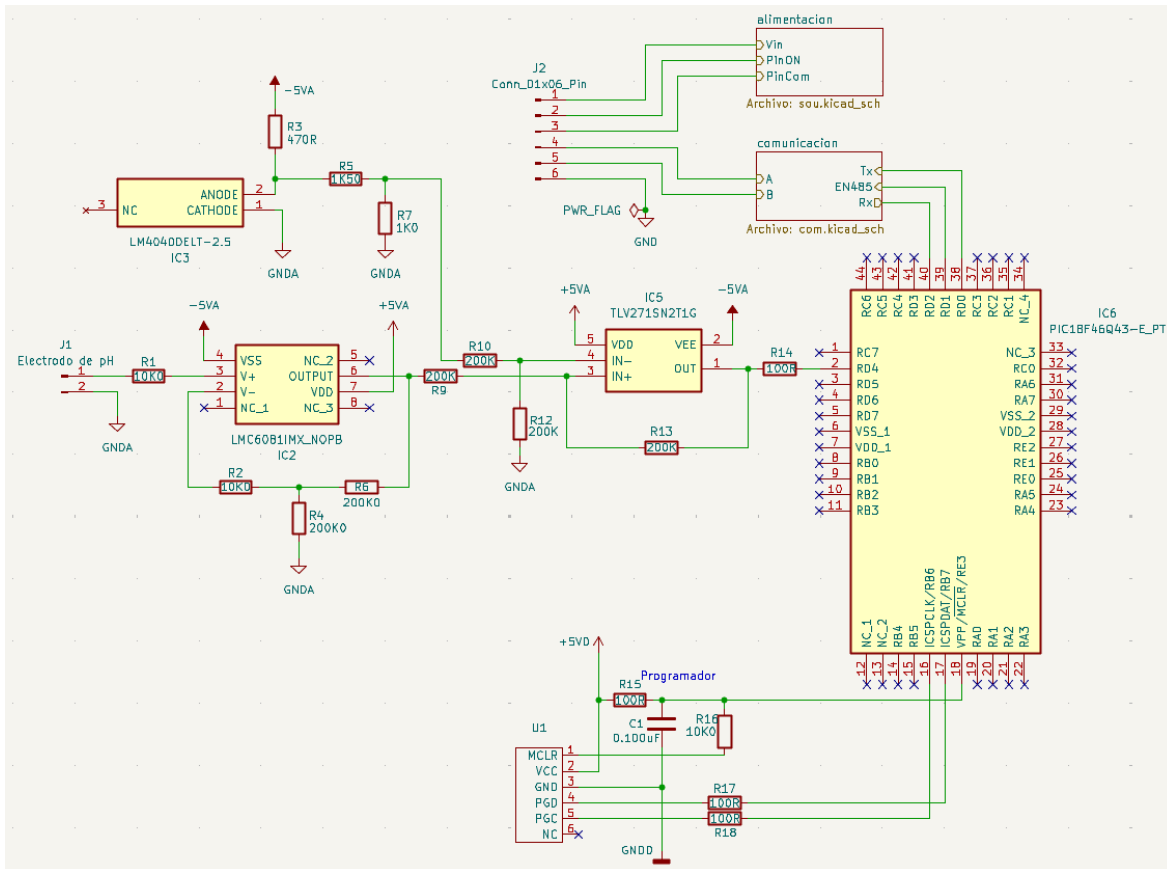
A continuación, se presenta el diseño completo del circuito acondicionador.

6.2 Diseño del circuito

Este acondicionador es un módulo independiente, por lo que cuenta con los circuitos correspondientes de alimentación, comunicaciones y programación.

A continuación, se explican las partes que conforman este acondicionador, que son: fuente de alimentación, sistema de comunicación RS-485, conexiones para programación, circuito de acondicionamiento, y el circuito de comunicación RS-485.

Ilustración 59: Diagrama general del acondicionador. pH



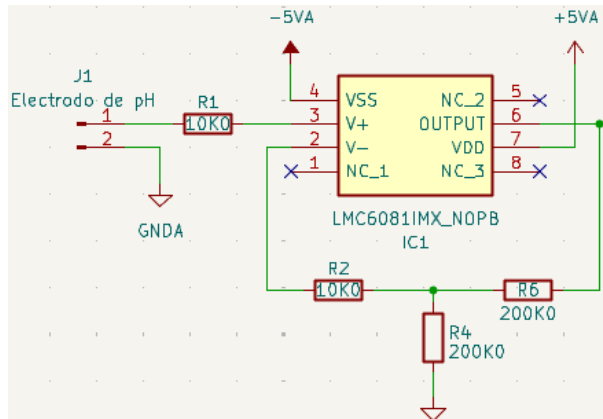
Circuito de acondicionamiento

Como ya se mencionó, la impedancia del electrodo que mide el valor de pH es muy elevada, por lo que se requiere un amplificador especializado con características particulares. En este caso se emplea el LMC6081, un amplificador operacional CMOS de precisión, de un solo canal, con entrada y salida riel a riel, muy bajo consumo y una corriente de polarización de entrada extremadamente baja (del orden de los 10 femtoamperios).

Por lo tanto, su impedancia de entrada se encuentra en el rango de los teraohmios, lo que lo convierte en un dispositivo capaz de medir la señal proveniente del electrodo de pH. Además, este amplificador puede operar correctamente con una alimentación de +5 V, lo que lo hace compatible con el resto de la electrónica de este acondicionador.

El amplificador se emplea en configuración no inversora y se busca obtener una ganancia de 2, como se explicó anteriormente. En el siguiente esquema se muestra el circuito de retroalimentación, conformado por una red de resistencias que incluye R6 y R4 de 200 kΩ, así como R2 de 10 kΩ.

Ilustración 60: Circuito de acondicionamiento. pH



Los cálculos son los siguientes: Al tratarse de un amplificador de alta impedancia de entrada, puede asegurarse que las corrientes de polarización son prácticamente nulas, por lo que se consideran igual a cero.

$$i^+ = i^- = 0$$

En la entrada no inversora:

$$\frac{V_i - V^+}{R_i} = 0$$

$$\therefore V_i = V^+ = V^-$$

En el nodo de las resistencias de retroalimentación:

$$i_f = i^+$$

$$\frac{V_o - V_x}{R} = \frac{V_x}{R}$$

Sustituyendo:

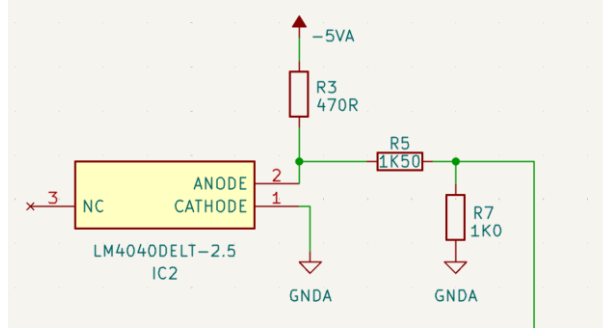
$$V_o - V_i = V_i$$

$$\therefore V_o = 2V_i \quad (14)$$

Con estos cálculos se demuestra que la ganancia del amplificador no inversor es igual a 2.

Como ya se mencionó, es necesario añadir un offset para terminar de acondicionar la señal. Lo primero es generar un voltaje preciso que se sumará a la señal obtenida del amplificador anterior. En este caso se requiere un voltaje negativo; para ello se emplea el LM4040-2.5, un circuito integrado de referencia de voltaje diseñado para proporcionar una salida fija de 2.5 V, con alta precisión y baja variación ante cambios de temperatura.

Ilustración 61: Voltaje de referencia. pH



El cátodo de la referencia se conecta a tierra, mientras que el ánodo se conecta mediante una resistencia de *pull-down* a -5 V . De esta forma, en el ánodo se obtiene el voltaje de la referencia, pero con signo negativo, es decir, -2.5 V . Posteriormente, se emplea un divisor de voltaje:

$$V_o = V_i \frac{R_7}{R_7 + R_5}$$

$$V_o = -2.5 \left(\frac{1\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega + 1.5\text{ k}\Omega} \right)$$

$$V_o = -1\text{ V}$$

De esta forma se obtiene un voltaje preciso de -1 V , que se suma a la señal del electrodo para generar un *offset* y producir una señal adecuada para ser medida por el ADC del microcontrolador.

Para sumar ambas señales se emplea un amplificador en configuración diferencial, cuyas resistencias son todas de $200\text{ k}\Omega$, lo que le confiere una ganancia unitaria. En esta etapa se utiliza el dispositivo “TLV271SN2T1G”, un amplificador riel a riel de un solo canal, capaz de funcionar correctamente con una alimentación de $+5\text{ V}$.

La entrada no inversora recibe la señal previamente acondicionada, proveniente del amplificador no inversor, es decir, la señal del electrodo (V_e). La entrada inversora recibe el voltaje negativo previamente explicado (-1 V). Aplicando la ecuación típica del amplificador diferencial:

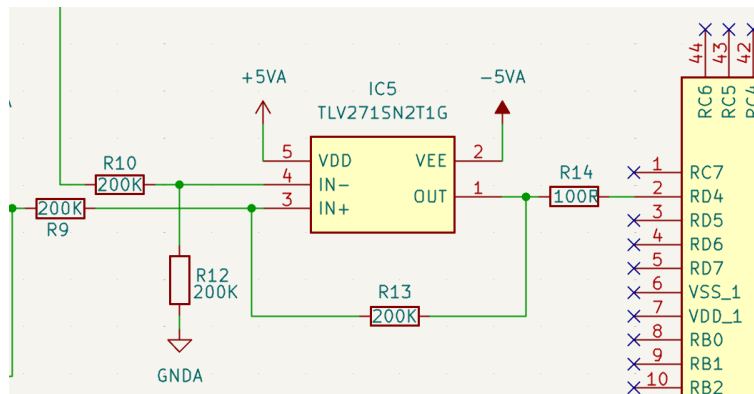
$$V_o = \frac{R_f}{R_i} (V^+ - V^-)$$

$$V_o = \frac{200\text{ K}\Omega}{200\text{ K}\Omega} (V_e - (-1\text{ V}))$$

$$\therefore V_o = V_e + 1\text{ V} \quad (15)$$

De esta forma se logra que el ADC del microcontrolador lea eficazmente todo el intervalo de señales, que después del acondicionamiento se encuentra en el intervalo de 0 V a 2 V .

Ilustración 62: Amplificador diferencial. pH



Es importante aclarar que, para obtener mayor resolución, el ADC del microcontrolador se configura con una referencia interna de 2.048 V. Esto significa que, al ser un ADC de 12 bits, la lectura mínima que realiza corresponde a aproximadamente 500 μ V, lo que implica que es capaz de registrar variaciones muy pequeñas.

6.3 Programación

El muestreo del acondicionador se realiza únicamente mediante la solicitud de un comando específico, ya que el muestreo constante no es necesario. Una vez que se recibe el comando adecuado se realiza el muestreo, el cálculo del valor de pH y se devuelve en un comando de respuesta.

Se revisa continuamente el bus de comunicaciones para recibir comandos como entregar información o modificar parámetros. El módulo opera mediante el protocolo de comunicación RS-485, el cual permite al dispositivo recibir instrucciones y responder conforme a los comandos recibidos.

El microcontrolador usado para leer el voltaje y procesar los datos para entregarlos al usuario es el PIC18F25Q43, que es de 8 bits e incorpora un ADC de 12 bits, con una resolución mínima de 500 μ V/bit en el rango de 0–2.048 V. Esta característica resulta adecuada para la medición precisa de señales analógicas en aplicaciones de instrumentación.

Además, cuenta con una memoria EEPROM de 1 KB y soporta, entre otras funciones, la comunicación UART. Estas especificaciones constituyen la base para el funcionamiento del acondicionador de pH.

Para esta aplicación únicamente se utilizan cuatro terminales: tres digitales destinadas a la comunicación y una analógica para la lectura del voltaje correspondiente al valor de pH.

La programación del microcontrolador se realizó en lenguaje C, utilizando el entorno MPLAB X IDE. Las características de este entorno, así como el dispositivo empleado para la programación del microcontrolador, se describen en el apartado anterior del acondicionador.

En la siguiente tabla se detallan las terminales utilizadas, el periférico al que están asignados, su función, su dirección y el nombre que se les ha asignado.

Tabla 24: Terminales del microcontrolador utilizados. pH

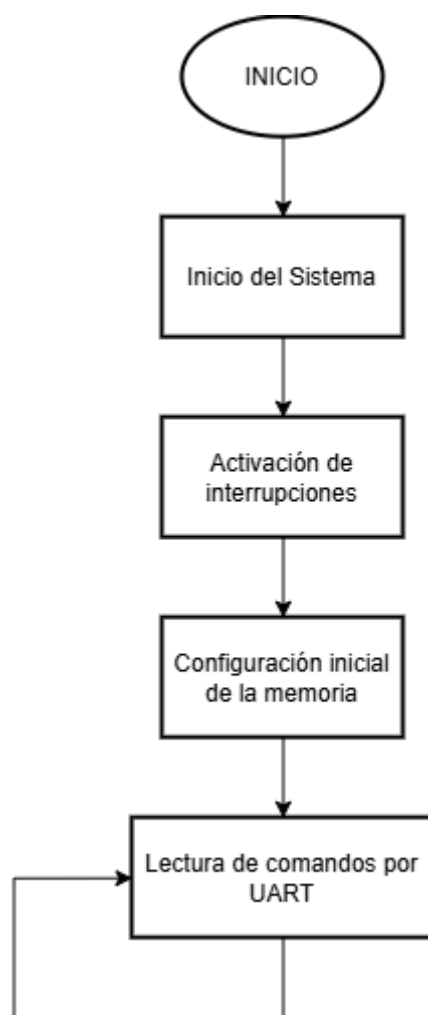
Terminal física	Nombre de terminal	Periférico	Función	Dirección	Nombre asignado
25	RB4	I/O digital	GPIO	output	EN485
24	RB3	UART1	RX1	input	IO-RB3
26	RB5	UART1	TX1	output	IO-RB5
2	RA0	ADCC	ANx	input	mPH

A continuación, se muestran los diagramas que explican el funcionamiento del sistema. La etapa de inicio del sistema se encarga de inicializar todos los módulos requeridos mediante funciones dedicadas, con el fin de garantizar un funcionamiento correcto.

En este caso, se inicializan los siguientes:

- CLOCK**: Establece la configuración del reloj interno del microcontrolador, indispensable para operar a una frecuencia de 64 MHz.
- PIN_MANAGER**: Define las condiciones iniciales de las terminales de entrada y salida.
- ADC**: Habilita el convertidor analógico-digital, encargado de registrar señales analógicas; en este caso, se utiliza para medir el voltaje proveniente del acondicionador.
- FVR**: Modifica el registro que ajusta la referencia interna de, que proporciona una base estable para las mediciones analógicas. En este sistema se emplea un valor de 2.048 V
- NVM**: Inicializa la memoria no volátil (EEPROM) para permitir operaciones de lectura y escritura de datos.
- UART1**: Configura el puerto serie UART1, destinado a la comunicación externa.
- INTERRUPT**: Activa y organiza el sistema de interrupciones. En este caso, las interrupciones se utilizan para habilitar un buffer de envío y recepción.

Ilustración 63: Funcionamiento general. pH

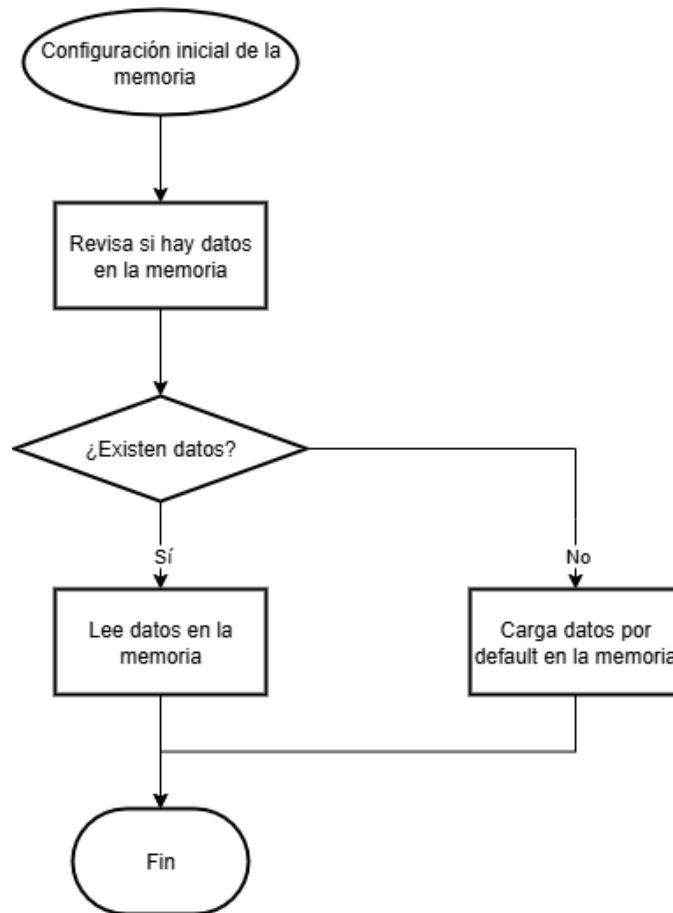


En este acondicionador la memoria se utiliza únicamente para almacenar las constantes de calibración, las cuales corresponden a la pendiente y la ordenada. Estos valores son de suma importancia, ya que forman parte de la ecuación lineal que rige el comportamiento del sistema y permiten obtener los valores reales de la medición.

La memoria utilizada en este dispositivo es la EEPROM del microcontrolador, la cual puede escribirse, borrarse y reprogramarse eléctricamente, lo que la convierte en una opción ideal para almacenar datos permanentes.

Como ya se explicó, los valores de la pendiente y la ordenada son datos de tipo flotante, por lo que se realiza una conversión a su representación en precisión simple (32 bits). Esto significa que cada dato flotante se almacena en cuatro celdas de memoria, garantizando la correcta preservación de la información de calibración.

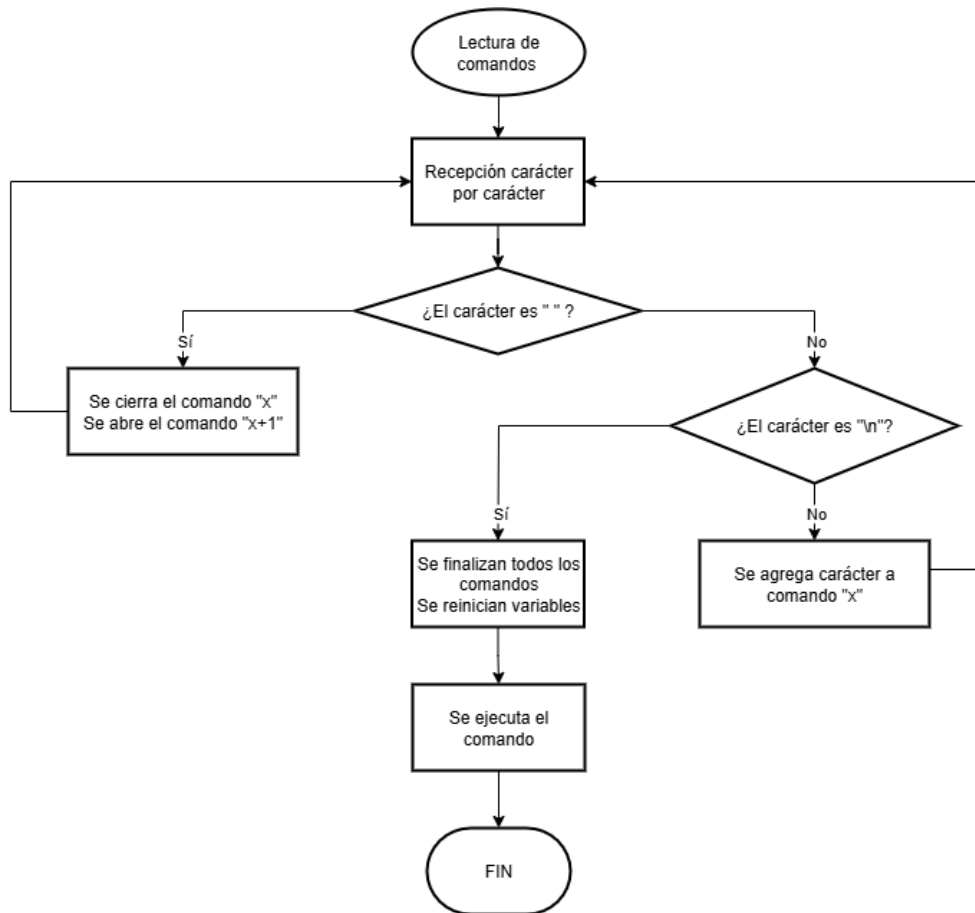
Ilustración 64: Configuración de la memoria. pH



La lectura de comandos se lleva a cabo de manera continua mediante un proceso de sondeo, con el fin de verificar la presencia de datos en el bus de comunicaciones. No obstante, se emplea también un sistema de interrupciones para administrar un buffer en el que se almacena cada cadena, ya sea de transmisión o de recepción. Esto garantiza que no se pierda información y que el sistema pueda procesar el mensaje completo.

El buffer, tanto para envío como para recepción, tiene una capacidad de 64 bytes (64 caracteres). Este tamaño resulta suficiente para evitar pérdidas de datos incluso en el caso de cadenas largas, cuya extensión máxima ronda los 35 caracteres.

Ilustración 65: Lectura de comandos. pH



Al momento de recibir los caracteres, el programa los procesa dividiéndolos en cadenas más pequeñas. Para delimitar cada comando se utiliza el carácter de espacio (" "), mientras que el salto de línea ("\n") marca el final de toda la cadena.

El sistema admite hasta tres comandos por cada cadena recibida. Estos comandos constituyen el medio de comunicación del acondicionador y se clasifican en dos tipos:

Comandos sin argumentos: en este caso, la cadena se fragmenta únicamente en dos secciones. La primera identifica la estación a la que se dirige la instrucción y la segunda especifica la función que debe ejecutarse.

Tabla 25: Comandos sin argumentos. pH

COMANDOS 00, 01 y 02 lectura de pH o voltaje o configuración			
ESTACION	SEPARADOR	Comando	Terminador
PHCXX	ESPACIO	XX	LF
XX (00 a FE) FF es llamada general usado para cambio de identificador	20_H	00 Regresa pH 01 Regresa Volt 02 Lee Config	0A_H

Tabla 26: Respuesta a comandos sin argumentos. pH

RESPUESTA COMANDO 02 Recupera configuración							
Estacion	Separador	Número de serie	Separador	Pendiente	Separador	Ordenada	Terminador
PHAXX	Espacio	XXXX	Espacio	X.XXXX	Espacio	X.XXXX	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador	20_H	Hexadecimal 4 dígitos	20_H	Flotante	20_H	Flotante	0A_H

En los comandos con argumentos, la cadena de recepción puede dividirse en hasta tres partes.

- La primera parte especifica la estación a la que se está llamando.
- La segunda corresponde a la variable que se desea modificar.
- La tercera indica el dato que se desea almacenar en la variable seleccionada.

Tabla 27: Comandos con argumentos. pH

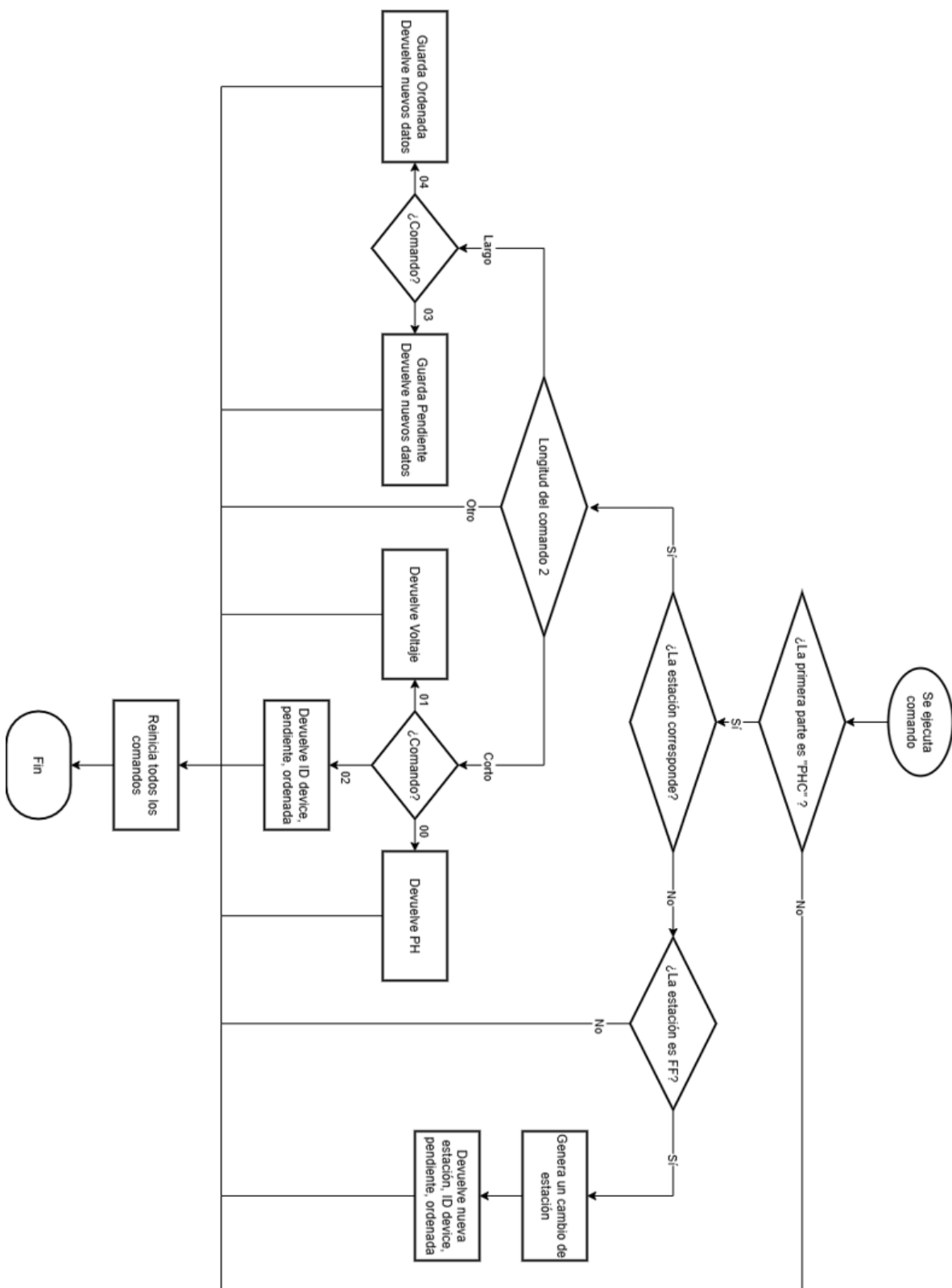
COMANDOS 03 en adelante					
ESTACION	SEPARADOR	Comando	SEPARADOR	ARGUMENTO	Terminador
PHCXX	ESPACIO	XX	NULO	NULO	LF
XX (00 a FE) Si XX=FF llamada general solo aplica al cambio de estación	20_H	03 Pendiente 04 Ordenada 05 Estación	20_H	Pendiente y ordenada Flotantes Estación 00 a FE Hexadecimal	0A_H

Tabla 28: Respuesta comandos con argumentos. pH

RESPUESTA COMANDOS 03 en adelante							
Estacion	Separador	Número de serie	Separador	Pendiente	Separador	Ordenada	Terminador
PHAXX	Espacio	XXXXXX	Espacio	X.XXXX	Espacio	X.XXXX	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador Si se cambio la estación responde con el nuevo número	20_H	Hexadecimal 6 dígitos	20_H	Flotante, si se cambio envía la nueva pendiente de lo contrario la anterior	20_H	Flotante, si se cambio envía la nueva ordenada de lo contrario la anterior	0A_H

El sistema interpreta los comandos de la siguiente forma:

Ilustración 66: Ejecución de comandos. pH



Finalmente, es importante señalar que el código se ejecuta de manera cíclica durante todo el tiempo de operación, asegurando la supervisión continua del sistema. Este ciclo se mantiene activo hasta que el acondicionador de pH sea desconectado, momento en el cual se detiene por completo la ejecución.

6.4 Desarrollo de la aplicación

La aplicación desarrollada para la calibración del acondicionador de pH fue implementada en LabVIEW. Esta herramienta permite obtener los datos almacenados en el dispositivo, así como generar nuevas constantes de calibración a partir de muestras con valores de pH conocidos.

Es importante señalar que la comunicación entre el acondicionador y el sistema se establece inicialmente mediante USB. Sin embargo, dado que el acondicionador opera bajo el protocolo RS-485, se requiere un módulo de conversión que adapte el formato de USB a RS-485.

La aplicación está compuesta únicamente por una pantalla principal, desde la cual es posible obtener datos y graficar puntos [*voltaje, pH*]. Estos gráficos permiten analizar la respuesta en voltaje frente a distintas muestras de pH, así como sus respectivos valores de voltaje.

Ilustración 67: Aplicación de pH



Una vez que se observa el comportamiento esperado (lineal), la interfaz puede guardar los datos en el microprocesador del sensor, ajustando así su respuesta. Además, se creará un archivo de texto donde se registran los datos que se cambiaron, junto con otros parámetros.

A continuación, se explica el funcionamiento y los pasos recomendados para su correcto uso.

1. Configurar el puerto de comunicación USB.

Una vez que el acondicionador está conectado mediante un cable USB, es necesario seleccionar en la aplicación el puerto COM correspondiente donde se encuentra conectado.

Ilustración 68: Selección de puerto. pH



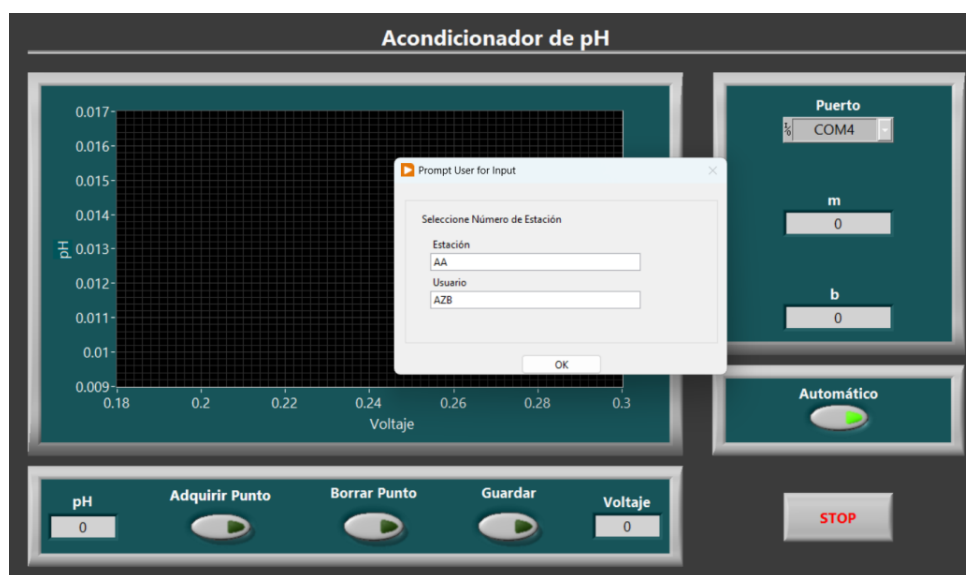
2. Inicio de la aplicación

Para iniciar el programa, únicamente se debe ejecutar la aplicación con el nombre “PH_Calibración”.

3. Llenar datos iniciales

Al ejecutar la aplicación, aparece una ventana en la que se solicita el número de estación a la que se desea escribir. Asimismo, se requiere ingresar el nombre del usuario encargado de calibrar el sensor, con la finalidad de registrar esta información en los archivos de texto generados.

Ilustración 69: Datos iniciales. pH



4. *Modo Automático*

Al iniciar, el programa iniciara en modo automático, donde se puede obtener el valor de pH de forma automática, también se muestran las constantes de calibración que se están utilizando para obtener los valores de pH.

Ilustración 70: Modo automático. pH



5. *Modo Calibración*

Para comenzar el proceso de calibración únicamente se tiene que desactivar el botón “Automático”, enseguida los botones de “adquirir punto”, “borrar punto”, “guardar” y el indicador de “voltaje” se activan obtener nuevas constantes de calibración.

6. *Introducir el valor de pH de la muestra que se está utilizando.*

Una vez conectado el sensor, se puede introducir en una muestra de pH conocido. Dicho valor de pH deberá ingresarse en el apartado correspondiente de la aplicación. Cuando el sensor esté sumergido en la muestra, es necesario esperar a que el valor de voltaje se estabilice; se recomienda un tiempo mínimo de espera de 4 segundos.

7. *Presionar el botón “adquirir punto”.*

Al presionar el botón, aparecerá un punto en la gráfica; dicho punto representa la respuesta en voltaje correspondiente al nivel de pH indicado.

8. *Repetir pasos 6 y 7.*

Los pasos 7 y 8 pueden repetirse tantas veces como sea necesario. Se considera que, mientras más puntos se obtengan, mayor será la exactitud del cálculo.

Ilustración 71: Ejemplo adquisición de pH



Además, si se requiere, puede presionarse el botón “Borrar” para eliminar el último punto graficado.

9. Guardar la pendiente y ordenada calculados. // Calibrar sensor.

Una vez que se hayan graficado el número de puntos deseados y se considere que la respuesta es la esperada (lineal), los datos pueden almacenarse para calibrar el sensor.

Al presionar el botón “Guardar”, casi de manera inmediata se desplegará un mensaje que indica que los valores de la pendiente y la ordenada se almacenaron correctamente.

Ilustración 72: Guardar datos. pH



Al mismo tiempo que se guardan las constantes de calibración en el acondicionador, se crea o actualiza un archivo de texto. La estructura del nombre de los archivos sigue el formato: **“PHCEstación”**

donde *Estación* corresponde a un número en formato hexadecimal.

Por ejemplo, si se utiliza la estación **“AA”** y se calibra, el archivo de texto tendrá el nombre **“PHCAA.txt”**.

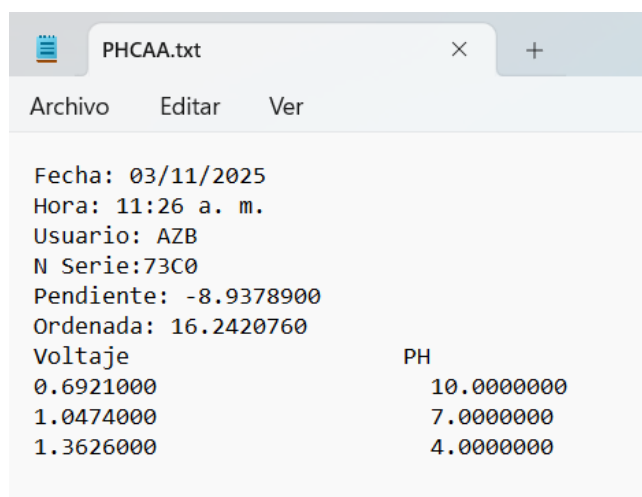
Los archivos de texto incluyen como cabecera los siguientes datos:

- Fecha
- Hora
- Usuario
- Número de serie del microcontrolador

Además, se muestran los valores de la pendiente y la ordenada, así como los puntos de voltaje frente al pH que se utilizaron para calibrar el acondicionador.

A continuación, se presenta un ejemplo de archivo de texto:

Ilustración 73: Archivo de texto. pH



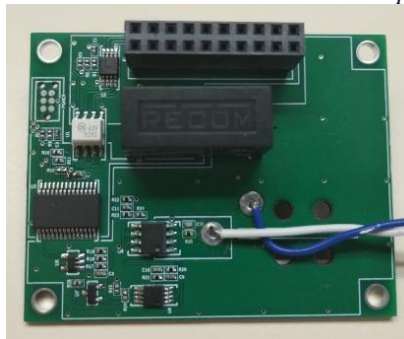
10. Detener el programa

Para terminar el uso del programa, se debe presionar el botón **“Terminar”**. Al ejecutar esta acción, el sistema inicia el proceso de cierre, el cual tarda aproximadamente 1 segundo, y posteriormente se detiene de manera definitiva.

6.5 Pruebas de funcionamiento

A continuación, se muestra el dispositivo desarrollado:

Ilustración 74: Acondicionador de pH



Ya se presentó el proceso de calibración, en el cual se emplearon tres soluciones de pH conocido para obtener una recta de tres puntos.

Ilustración 75: Muestras estándar de pH



Los puntos obtenidos se presentan en la siguiente tabla, donde se observa que la relación entre el voltaje y el pH es lineal.

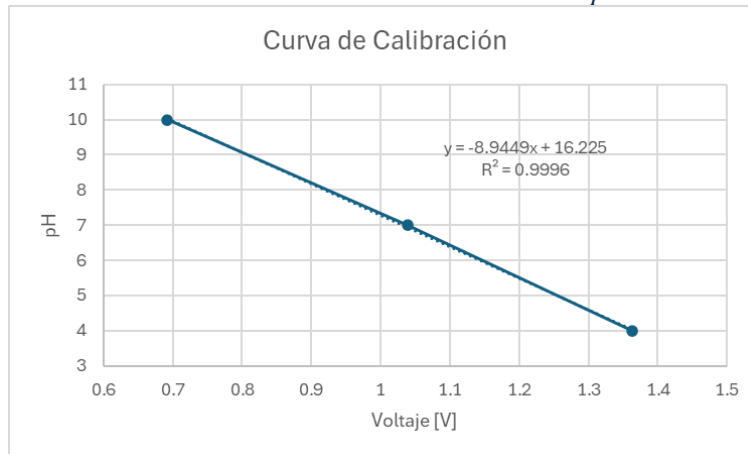
Tabla 29: Relación voltaje - pH

V	pH
0.6921	10
1.0391	7
1.3626	4

Estos puntos de calibración se presentan en la siguiente gráfica, junto con la pendiente y la ordenada al origen. Los datos fueron almacenados en el microcontrolador para ser utilizados en la ecuación de la recta, de modo que el voltaje medido se transforma matemáticamente en el valor de pH correspondiente.

En este caso, el coeficiente de correlación obtenido fue $R = 0.9996$, lo cual indica una relación prácticamente perfecta entre el voltaje y el pH, confirmando la linealidad del modelo y la confiabilidad del proceso de calibración.

Ilustración 76: Curva de calibración. pH



Una vez que el dispositivo se encuentra calibrado, se repiten las mediciones en las soluciones de pH conocido con el fin de comprobar la respuesta del acondicionador. Para ello, mediante una aplicación especializada en comunicaciones por puerto USB se envían los comandos adecuados que permiten solicitar el valor de pH.

Ilustración 77: Medición con el sensor de pH



Los resultados obtenidos para cada muestra se presentan a continuación:

Ilustración 78: Resultados de las mediciones. pH

» PHCAA 00	» PHCAA 00	» PHCAA 00
« PHAAA 4.0870	« PHAAA 7.0018	« PHAAA 10.0150
» PHCAA 00	» PHCAA 00	» PHCAA 00
« PHAAA 4.0908	« PHAAA 7.0158	« PHAAA 10.0215
» PHCAA 00	» PHCAA 00	» PHCAA 00
« PHAAA 4.0889	« PHAAA 7.0112	« PHAAA 10.0243

Se puede notar que los valores obtenidos corresponden al valor real y que el resultado es bastante estable, lo cual indica que el acondicionador funciona correctamente y que la calibración fue realizada de manera adecuada. Con ello se concluye que tanto el acondicionador como la aplicación de calibración están implementados y programados correctamente.

7 Módulo de Nivel

7.1 Principio de funcionamiento

En este proyecto se tomó la decisión de medir el nivel de agua haciendo uso de un sensor de presión, porque ofrecen una gran precisión en aplicaciones de bajo nivel, como lo son las lagunas de tratamiento.

Con este sensor podemos hacer uso de la relación de la presión hidrostática con la altura de la columna de agua sobre el sensor, que se explica con la siguiente ecuación:

$$P = \rho * g * h \quad (16)$$

Donde:

- P es la presión medida por el sensor
- ρ es la densidad del líquido
- h es la altura de la columna de agua

De esta forma es posible obtener la altura de agua sobre el sensor de presión, despejando la altura:

$$h = \frac{P}{\rho * g}$$

Para medir el nivel de agua se emplea el sensor de presión digital de la serie NPI-19, el cual se comunica mediante la interfaz I²C. Este dispositivo ofrece una resolución de 14 bits y está fabricado con cuerpo y membrana de acero inoxidable 316L, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en contacto directo con agua.

La elección de este material resulta especialmente ventajosa en entornos como lagunas, ya que su elevada resistencia a la corrosión frente a cloruros y sales presentes en aguas naturales garantiza una mayor durabilidad del sensor. Además, el acero inoxidable 316L mantiene su integridad estructural en condiciones de humedad constante y en presencia de materia orgánica, lo que asegura un funcionamiento confiable a largo plazo.

En este proyecto se utiliza la versión con rango máximo de 2.5 psi. Además, se seleccionó el modelo diferencial, que mide la presión relativa respecto a la presión atmosférica. En otras palabras, el sensor toma como referencia la presión atmosférica. Esta característica resulta ideal para la medición de niveles de agua, ya que el sensor compensa internamente la presión atmosférica, simplificando el cálculo de la altura de la columna de líquido.

La salida digital del sensor se expresa con la siguiente ecuación:

$$O_s = \frac{P (O_M - O_m)}{P_M} + O_m \quad (17)$$

Donde:

O_s = Salida digital que entrega el sensor

P = Presión medida

O_M = Salida digital máxima = 14746

O_m = Salida digital mínima = 1638

P_M = Presión máxima = 2.5 [psi]

Debido a que el transductor se utilizará para la medición de un nivel de agua dulce, podemos cambiar las unidades a [mca] metros columna de agua con lo que la lectura será directamente el nivel de la laguna.

$$1 \text{ psi} = 0.7031 \text{ [mca]}$$

Al obtener la cuenta máxima de 2.5 psi se estará obteniendo el equivalente a una columna de agua de 1.7578 m, que es equivalente a H_M y la ecuación que rige al transductor nos entregará directamente la altura.

$$h = \frac{(O_s - O_m) * H_M}{O_M - O_m}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación y resolviendo, se obtiene la ecuación que expresa la presión medida:

$$h = 134.103e^{-6} * O_s - 219.6584e^{-3} \text{ [m]}$$

La resolución del acondicionador se determina como la relación de la diferencia del valor máximo de cuentas que representa la altura máxima con el número mínimo de cuentas que representa la altura mínima, que en este caso son 0 m.

$$h_s \text{ [m]} = \frac{h_M - h_m}{O_M - O_m} = \frac{1.7578 - 0}{14746 - 1638}$$

$$\therefore h_s = 134 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Esto evidencia que el sensor es capaz de detectar variaciones extremadamente pequeñas en el nivel de agua, lo cual constituye una ventaja significativa. En el contexto de las lagunas donde se instalará la estación de medición, la profundidad absoluta no resulta un parámetro crítico; en cambio, disponer de una resolución adecuada permite registrar con precisión las fluctuaciones del nivel, que son las verdaderamente relevantes para el análisis.

Las lagunas de estabilización realizan sus procesos biológicos principalmente mediante la acción de microorganismos y la energía proveniente de la radiación solar. Por esta razón, estas lagunas no suelen ser profundas: si la columna de agua fuera demasiado profunda, la luz solar no penetraría hasta el fondo y los procesos biológicos se verían limitados.

En consecuencia, este tipo de sistemas se diseñan con grandes superficies y baja profundidad, lo que permite que la radiación solar alcance todas las zonas y active de manera uniforme los procesos biológicos. Bajo estas condiciones, una variación de nivel de apenas unos centímetros puede representar un cambio significativo en el volumen total de agua.

Por ello, en el acondicionador desarrollado se prioriza la resolución de medición sobre el alcance máximo, ya que lo más relevante es detectar con precisión las pequeñas fluctuaciones de nivel que impactan directamente en el comportamiento de la laguna.

Al analizar los intervalos de salida digital del sensor NPI-19 es posible determinar el valor máximo de presión que este dispositivo puede medir. A partir de dicho límite, se calcula la altura máxima de columna de agua que el sensor puede registrar.

El valor digital máximo que entrega el sensor es: 14746. Sustituyendo:

$$P = 1.315 * (14746) - 2153.97 \text{ [Pa]}$$

$$P_{Max} = 17237.02 \text{ [Pa]}$$

Para obtener el nivel:

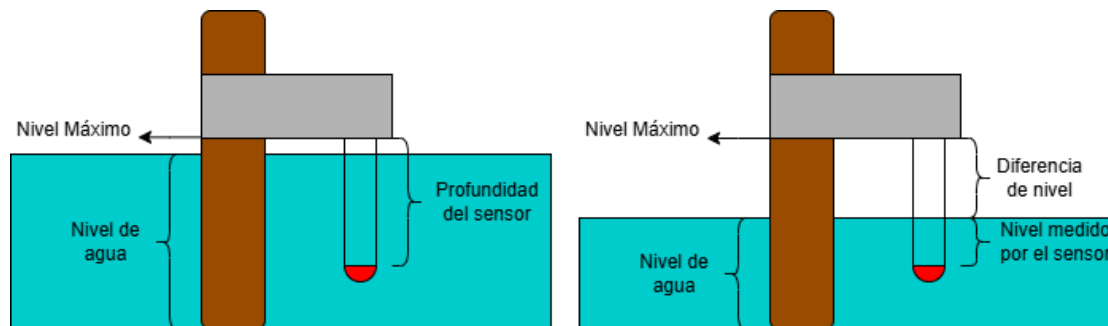
$$N_s \text{ [m]} = \frac{P}{\rho * g} = \frac{17237.02}{1000 * 9.81}$$

$$\therefore N_{sMax} = 1.75 \text{ [m]}$$

La estación se instala sobre una plataforma ubicada en el nivel máximo de agua. A partir de este punto de referencia, el sensor se sumerge utilizando un tubo de soporte. La longitud máxima del tubo debe corresponder al nivel máximo que el sensor puede registrar, garantizando que la inmersión no exceda el rango de presión especificado por el dispositivo.

$$\therefore \textit{Profundidad del sensor} \approx 1.75 \text{ [m]}$$

Ilustración 79: Uso del sensor de nivel



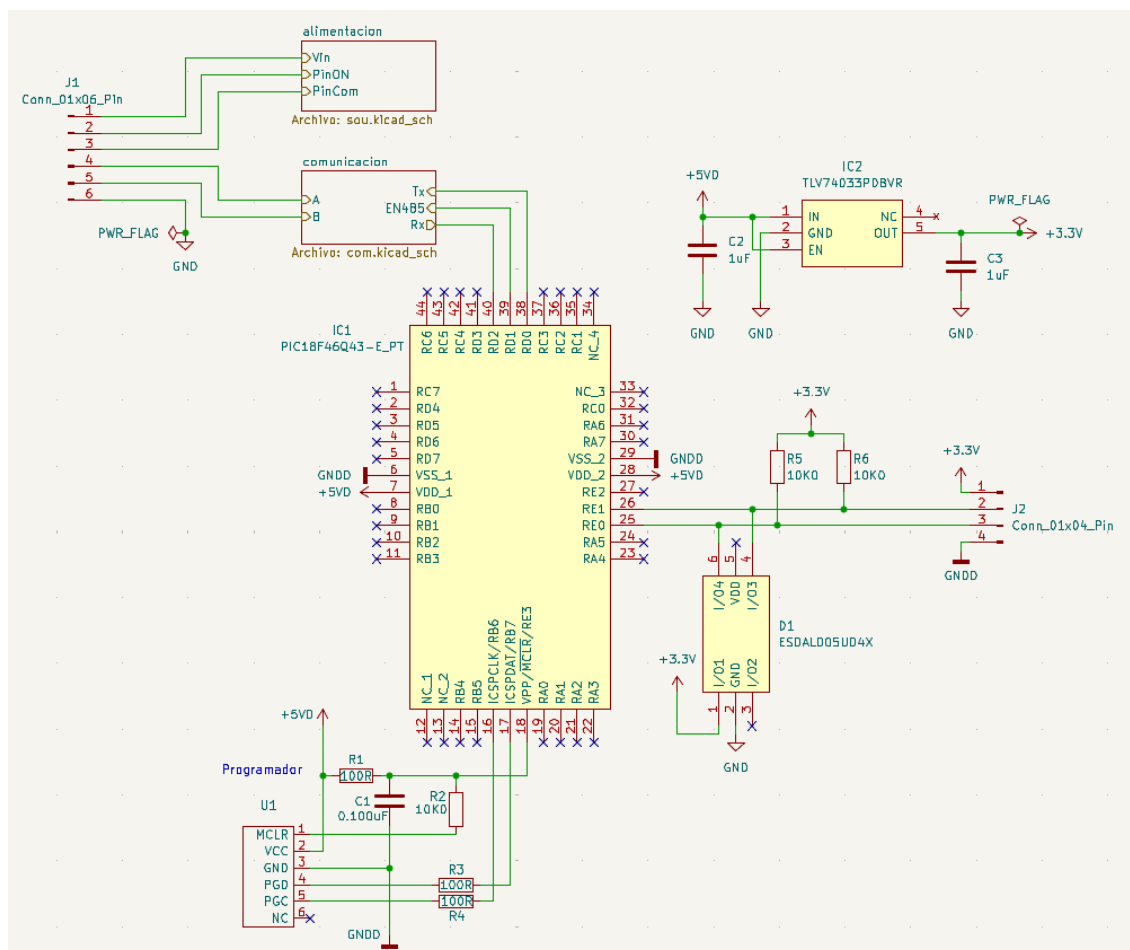
Con los valores obtenidos del sensor es posible calcular el nivel de agua relativo al nivel máximo de referencia:

$$\textit{Nivel de agua [m]} = \textit{Nivel máximo} - (\textit{Profundidad del sensor} - \textit{Nivel medido})$$

7.2 Diseño del circuito

Este acondicionador no requiere un gran número de componentes, ya que el sensor NPI-19 es digital y se comunica mediante la interfaz I²C. A continuación, se describen los elementos que conforman el acondicionador. Cabe recordar que, al tratarse de un módulo independiente, incluye los circuitos necesarios de alimentación, comunicaciones y programación, los cuales fueron explicados previamente.

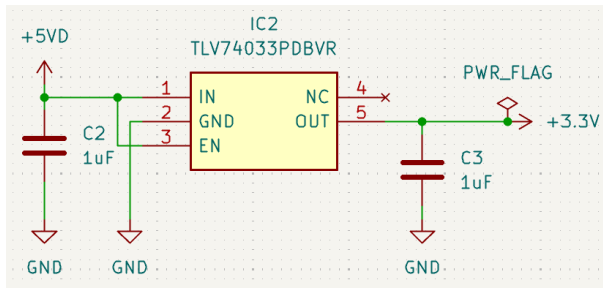
Ilustración 80: Diagrama general del acondicionador. Nivel



Alimentación del sensor

El sensor NPI-19 requiere una alimentación estable de 3.3 V, por lo que se emplea el regulador lineal de baja caída “TLV74033PDBVR”. Este dispositivo ofrece bajo consumo de corriente en reposo y protección integrada, lo que lo convierte en una solución adecuada para alimentar sensores digitales de manera segura y confiable.

Ilustración 81: Alimentación del sensor. Nivel



Adicionalmente se añaden capacitores de desacoplo para filtrar ruido de alta frecuencia y asegurar que el sensor recibe una tensión estable y libre de perturbaciones.

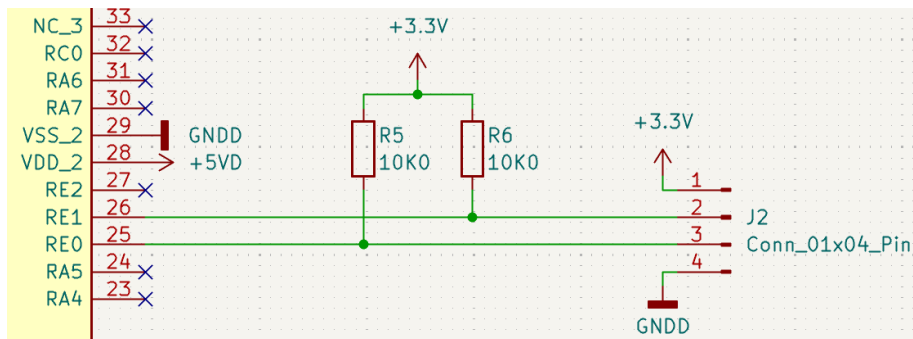
Bus I^2C

El sensor NPI-19 se comunica mediante el protocolo I²C, un sistema de transmisión serie síncrono que conecta múltiples dispositivos electrónicos utilizando únicamente dos líneas: datos (SDA) y reloj (SCL). La principal ventaja de este protocolo es su simplicidad, ya que permite la interconexión de varios periféricos con un número reducido de conductores, optimizando el diseño del circuito.

Para que el bus de comunicación funcione correctamente, es indispensable el uso de resistencias pull-up, debido a que las líneas SDA y SCL son de tipo open-drain. Esto implica que los dispositivos conectados al bus únicamente pueden forzar la línea a nivel bajo (0 lógico), mientras que el nivel alto (1 lógico) debe establecerse externamente mediante dichas resistencias.

En este diseño se añaden resistencias de 10 k Ω como pull-up en cada línea de comunicación, asegurando una transición confiable de los niveles lógicos.

Ilustración 82: Bus I2C. Nivel

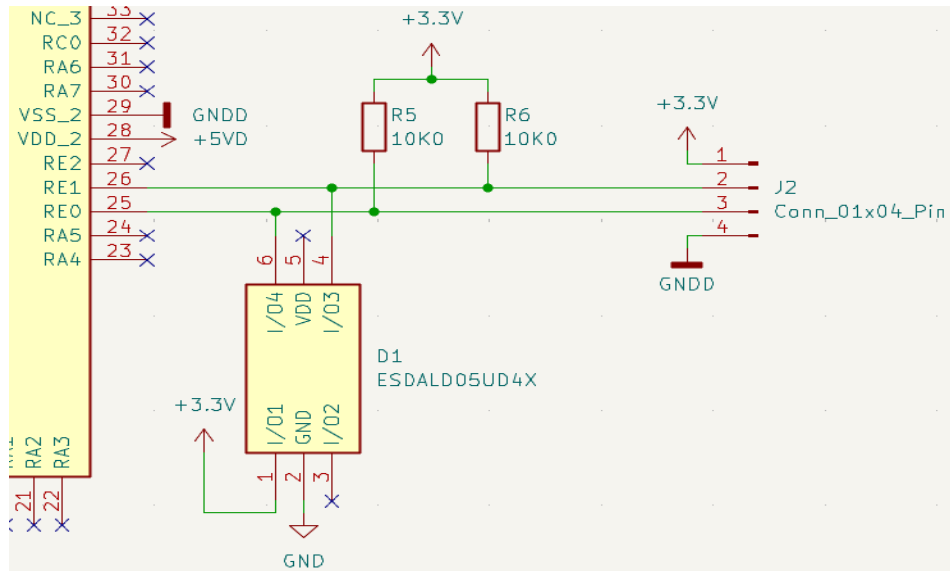


Protección contra descargas electrostáticas

Al ser un sensor sumergido se crea un ambiente húmedo que favorece corrientes de fuga y descargas inesperadas en el bus de comunicación. Para prevenir descargas que perjudiquen el resto del acondicionador o de la estación se coloca el “ESDALD05UD4X” que es un dispositivo de protección contra descargas electrostáticas y sobretensiones transitorias.

Es ideal para proteger la comunicación I^2C ya que tiene baja capacitancia que no distorsiona las formas de onda ni limita la velocidad de comunicación. La conexión se realiza en paralelo con cada línea de comunicación, además también se agrega la línea de alimentación del sensor para mantenerla protegida también.

Ilustración 83: Protección contra descargas. Nivel



7.3 Programación

La función primordial de este acondicionador consiste en establecer comunicación con el sensor, el cual emplea la interfaz I^2C . Dicho sensor es responsable de proporcionar el valor base a partir del cual se realizan todos los cálculos posteriores.

El microcontrolador seleccionado es el PIC18F25Q43, que dispone de una memoria EEPROM de 1 KB y admite, entre otras características, la comunicación UART y el protocolo I^2C . Estas capacidades lo convierten en una opción adecuada para la gestión de este acondicionador.

Este acondicionador constituye un módulo independiente, cuya interacción con el resto de la estación se realiza mediante el protocolo de comunicación RS-485. El bus de comunicaciones es monitoreado de forma continua en busca de comandos específicos, los cuales determinan las acciones que debe ejecutar el acondicionador.

Para su funcionamiento se emplean únicamente cuatro terminales: dos dedicados a la comunicación RS-485, una terminal digital destinada al control de la transmisión, y dos terminales adicionales para la interfaz I^2C . En la tabla siguiente se presentan las terminales utilizadas, el periférico al que están asignados, su función, su dirección y el nombre asignado en la programación.

Tabla 30: Terminales utilizadas. Nivel

Terminal física	Nombre de terminal	Periférico	Función	Dirección	Nombre asignado
14	RC3	I2C1	SCL1	in/out	SCL
15	RC4	I2C1	SDA1	in/out	SDA
24	RB3	UART1	RX1	Input	RX
25	RB4	UART1	TX1	output	TX
26	RB5	I/O digital	GPIO	Output	EN485

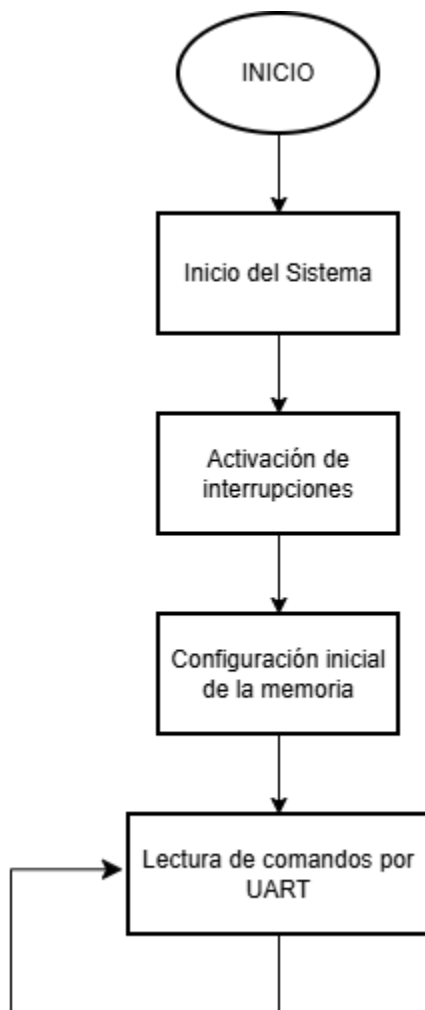
A continuación, se muestran los diagramas que explican el funcionamiento del sistema. La etapa de inicio del sistema se encarga de inicializar todos los módulos requeridos mediante funciones dedicadas, con el fin de garantizar un funcionamiento correcto.

En este caso, se inicializan los siguientes:

- CLOCK**: Establece la configuración del reloj interno del microcontrolador, indispensable para operar a una frecuencia de 64 MHz.
- PIN_MANAGER**: Define las condiciones iniciales de las terminales de entrada y salida.
- I2C_Host**: Inicializa el bus I²C en modo host, permitiendo la comunicación serial con múltiples periféricos mediante las líneas SDA y SCL.
- NVM**: Inicializa la memoria no volátil (EEPROM) para permitir operaciones de lectura y escritura de datos.
- UART1**: Configura el puerto serie UART1, destinado a la comunicación externa.
- INTERRUPT**: Activa y organiza el sistema de interrupciones, lo que posibilita una respuesta inmediata a eventos internos o externos. En este caso, las interrupciones se utilizan para habilitar automáticamente un buffer de envío y recepción, garantizando una gestión eficiente de los comandos.

Este acondicionador realiza el muestreo únicamente por solicitud, mediante un comando específico, al recibir el comando se establece comunicación con el sensor, se solicita un muestreo y la lectura de datos. Posteriormente se realizan los cálculos para obtener el nivel del agua.

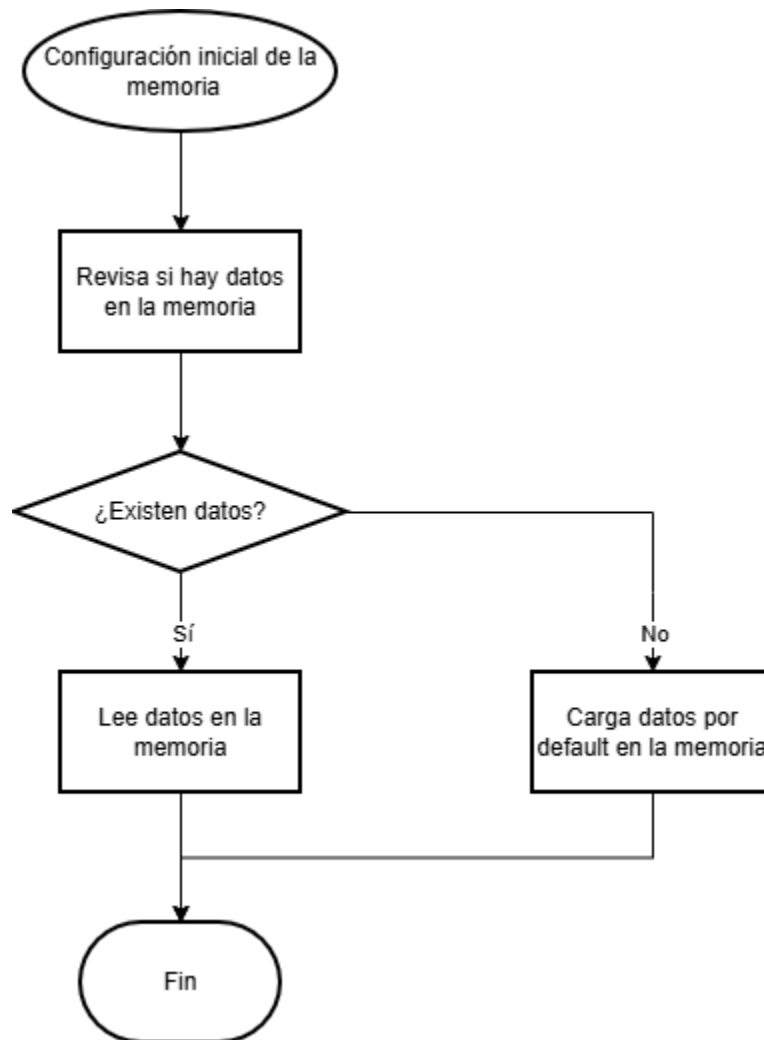
Ilustración 84: Funcionamiento general. Nivel



En este acondicionador, la memoria se emplea exclusivamente para almacenar el número de estación, representado en formato hexadecimal. La conservación de este valor resulta fundamental, ya que permite identificar de manera precisa la estación en todo momento y, con ello, establecer una comunicación confiable con el módulo correspondiente.

La memoria utilizada en este dispositivo es la EEPROM del microcontrolador, la cual puede escribirse, borrarse y reprogramarse eléctricamente, lo que la convierte en una opción ideal para almacenar datos permanentes.

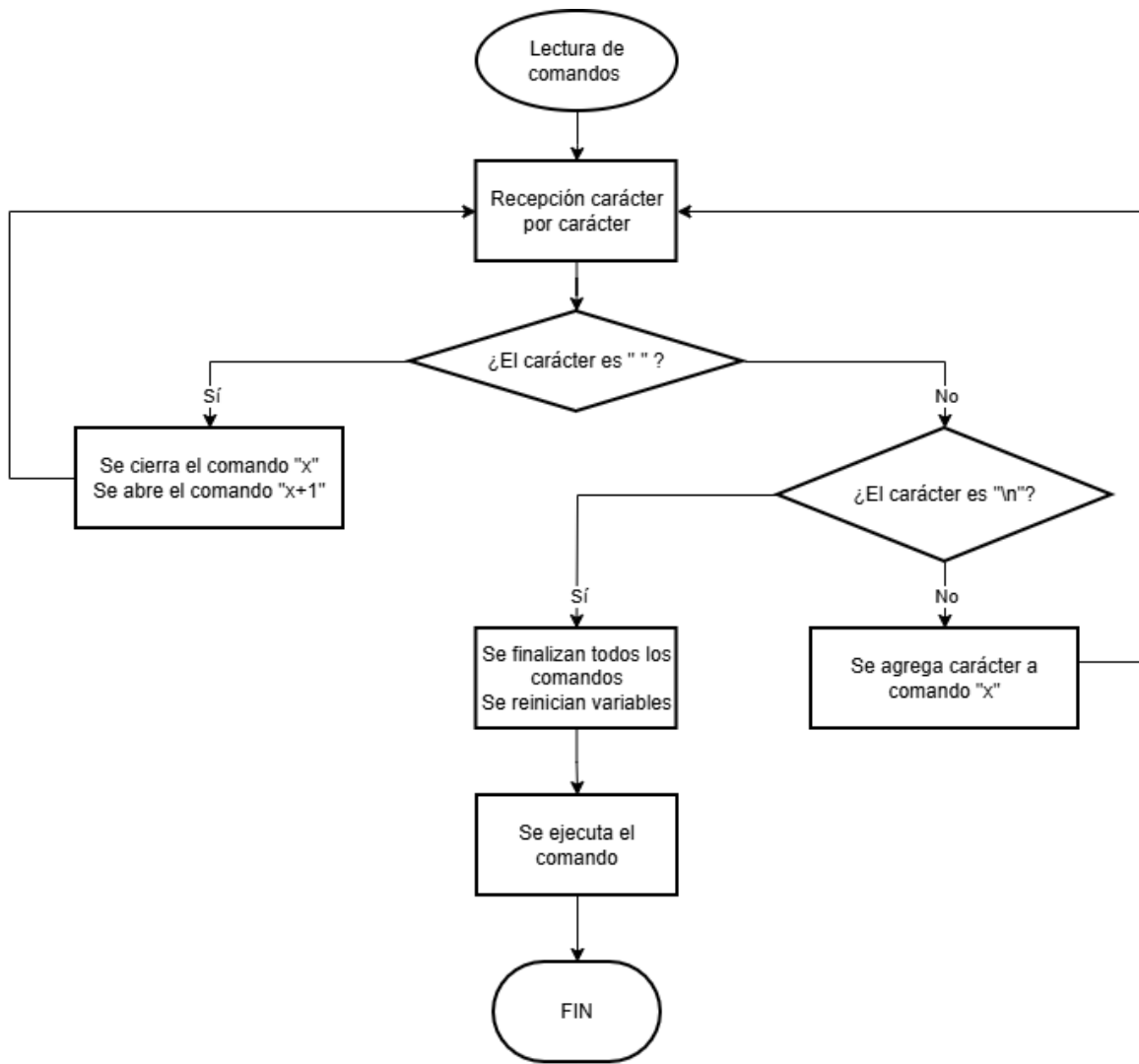
Ilustración 85: Configuración de la memoria. Nivel



La lectura de comandos se lleva a cabo de manera continua mediante un proceso de sondeo, con el fin de verificar la presencia de datos en el bus de RS-485. No obstante, se emplea también un sistema de interrupciones para administrar un buffer en el que se almacena cada cadena, ya sea de transmisión o de recepción. Esto garantiza que no se pierda información y que el sistema pueda procesar el mensaje completo.

El buffer, tanto para envío como para recepción, tiene una capacidad de 64 bytes (64 caracteres). Este tamaño resulta suficiente para evitar pérdidas de datos incluso en el caso de cadenas largas, cuya extensión máxima ronda los 35 caracteres.

Ilustración 86: Lectura de comandos. Nivel



Al momento de recibir los caracteres, el programa los procesa dividiéndolos en cadenas más pequeñas. Para delimitar cada comando se utiliza el carácter de espacio (" "), mientras que el salto de línea ("n") marca el final de toda la cadena.

El sistema admite hasta tres comandos por cada cadena recibida. Estos comandos constituyen el medio de comunicación del acondicionador y se clasifican en dos tipos:

Comandos sin argumentos: en este caso, la cadena se fragmenta únicamente en dos secciones. La primera identifica la estación a la que se dirige la instrucción y la segunda especifica la función que debe ejecutarse.

Tabla 31: Comandos sin argumentos. Nivel

COMANDOS 00, 01 y 02			
ESTACION	SEPARADOR	Comando	Terminador
NIVXX	ESPACIO	XX	LF
XX (00 a FE) FF es llamada general usado para cambio de identificador	20_H	00 Regresa presión 01 Regresa nivel del sobre el sensor 02 Regresa Nivel de agua	0A_H

Tabla 32: Respuesta a comandos sin argumentos. Nivel

RESPUESTA COMANDOS 00 y 01 Lectura			
Estacion	Separador	Magnitud	Terminador
PHAXX	Espacio	X.XXXX	LF
XX (00 a FE) Responde con el identificador	20_H	Dos enteros y 4 decimales	0A_H

En los comandos con argumentos, la cadena de recepción puede dividirse en hasta tres partes.

- La primera parte especifica la estación a la que se está llamando.
- La segunda corresponde a la variable que se desea modificar.
- La tercera indica el dato que se desea almacenar en la variable seleccionada.

Este acondicionador no requiere de pendientes u ordenadas, por lo que el único caso donde se utilizaran los comandos con argumentos es cuando se necesita un cambio de estación.

Tabla 33: Comandos con argumentos. Nivel

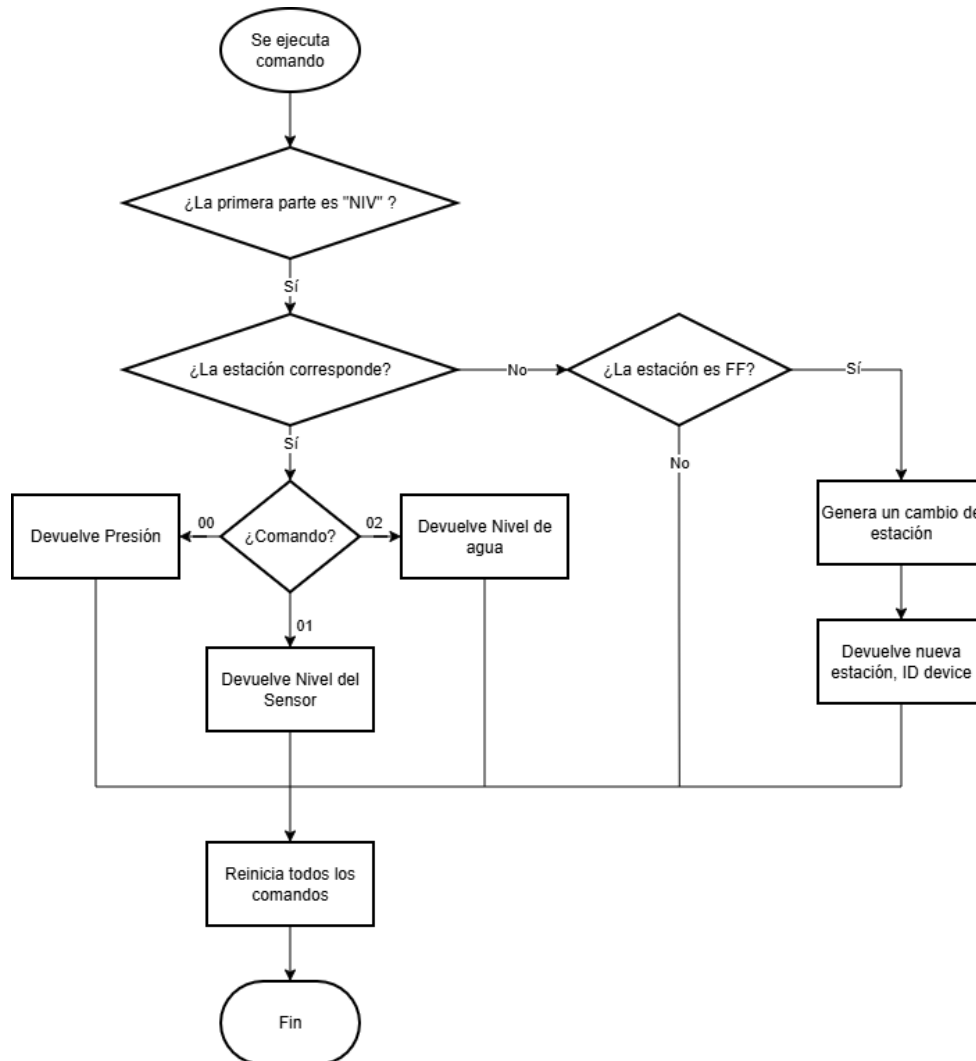
COMANDOS CON ARGUMENTOS					
ESTACION	SEPARADOR	Comando	SEPARADOR	ARGUMENTO	Terminador
PHCXX	ESPACIO	XX	NULO	NULO	LF
FF llamada general solo aplica al cambio de estación	20_H	05 Estación	20_H	Estación 00 a FE Hexadecimal	0A_H

Tabla 34: Respuesta a comandos con argumentos. Nivel

RESPUESTA DE COMANDOS CON ARGUMENTOS			
Estacion	Separador	Número de serie	Terminador
PHAXX	Espacio	XXXX	LF
Si se cambio la estación responde con el nuevo número	20 _H	Hexadecimal 4 dígitos	0A _H

El código interpreta los comandos de la siguiente forma:

Ilustración 87: Interpretación de comandos. Nivel

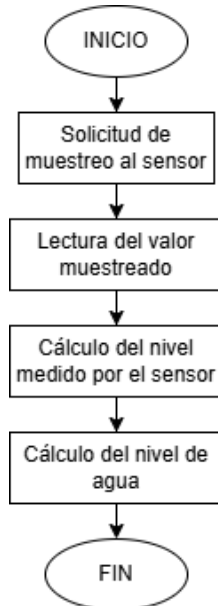


Para muestrear los datos del sensor de presión es necesario establecer comunicación mediante la interfaz I²C. La hoja de datos del dispositivo especifica que, en primer lugar, debe enviarse una orden para iniciar la medición de presión. Posteriormente, se requiere transmitir otro comando para solicitar la lectura de los datos obtenidos.

Además de obtener el valor de presión, es indispensable realizar los cálculos previamente descritos con el fin de determinar tanto el nivel de agua medido por el sensor como el nivel real de agua presente en la laguna.

Por lo tanto, cada vez que se requiera obtener el valor de presión del sensor, se seguirá el procedimiento detallado a continuación:

Ilustración 88: Cálculo del nivel



7.4 Desarrollo de la aplicación

La aplicación desarrollada para este acondicionador fue también implementada en LabVIEW y permite la verificación de la electrónica relacionada al puerto I²C y la calibración del sensor, además permite hacer lecturas de forma automática para comprobar el funcionamiento del acondicionador.

Es importante señalar que la comunicación entre el acondicionador y el sistema se establece inicialmente a través de USB. Sin embargo, dado que el acondicionador opera bajo el protocolo RS-485, se requiere un módulo de conversión que adapte el formato de USB a RS-485.

A continuación, se describen los pasos necesarios para establecer la comunicación y garantizar el correcto funcionamiento del acondicionador.

1. Configuración del puerto de comunicación USB

Una vez que el acondicionador se conecta mediante un cable USB, es necesario seleccionar en la aplicación el puerto COM correspondiente en el que se encuentra conectado.

Ilustración 89: Selección de puerto. Nivel



2. Inicio del programa

Para ejecutar el sistema, únicamente se debe abrir la aplicación denominada “Nivel”.

3. Introducción de datos iniciales

Al iniciar la aplicación, aparece un mensaje emergente que solicita al usuario seleccionar la estación con la cual se desea establecer la comunicación.

Ilustración 90: Datos iniciales. Nivel



4. Modo Automático

En el modo automático se pueden observar las mediciones del acondicionador de forma continua, para corroborar el funcionamiento del acondicionador.

Ilustración 91: Modo automático. Nivel



5. Modo Calibración

Para comenzar el proceso de calibración únicamente se tiene que desactivar el botón “Automático”, enseguida los botones de “adquirir punto”, “borrar punto”, “guardar” y el indicador de “nivel medido” se activan obtener nuevas constantes de calibración.

6. Introducir el nivel real que se está midiendo

Se tiene que introducir el valor que se está midiendo para graficar el punto y posteriormente obtener los valores de la pendiente y ordenada que sirven para calibrar el acondicionador.

Ilustración 92: Modo calibración. Nivel



7. Presionar el botón “adquirir punto”

Al presionar el botón se gráfica el primer punto, que representa la relación entre el nivel real con el nivel medido, de esta forma se pueden calcular las variables de calibración.

Este paso se puede repetir las veces que sea necesario para graficar múltiples puntos. Se considera que entre más puntos existan, mayor será la exactitud del cálculo.

En caso de equivocación se puede presionar el botón “borrar” para eliminar el último punto graficado.

8. *Guardar datos*

Una vez que se han graficado el número de puntos deseados, ya se han calculado de forma automática los valores de la pendiente y ordenada. Al presionar el botón “guardar” las variables se almacenan en el acondicionador para complementar el cálculo del nivel de forma correcta.

Ilustración 93: Guardar datos. Nivel



Al mismo tiempo que se guardan las constantes de calibración en el acondicionador, se crea o actualiza un archivo de texto. La estructura del nombre de los archivos sigue el formato: “NIV_Estación”

donde *Estación* corresponde a un número en formato hexadecimal.

Por ejemplo, si se utiliza la estación “AA” y se calibra, el archivo de texto tendrá el nombre “TEMP_AA.txt”.

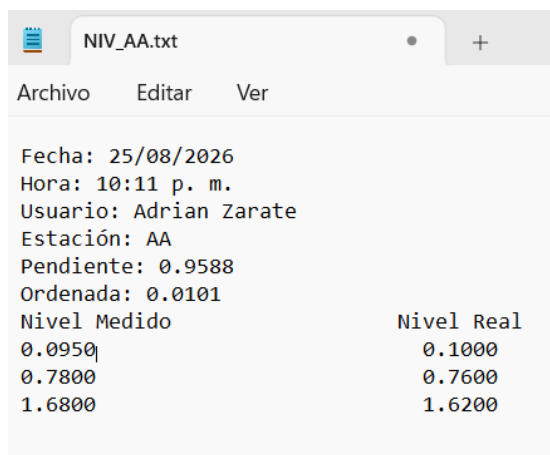
Los archivos de texto incluyen como cabecera los siguientes datos:

- Fecha
- Hora
- Usuario
- Número de serie del microcontrolador

Además, se muestran los valores de la pendiente y la ordenada, así como los puntos de nivel real frente al nivel medido que se utilizaron para calibrar el acondicionador.

A continuación, se presenta un ejemplo de archivo de texto:

Ilustración 94: Archivo de texto. Nivel



9. Detener del programa

Para concluir el uso de la aplicación, se debe presionar el botón “Terminar”. Al ejecutar esta acción, el sistema detiene su funcionamiento y detiene la adquisición de mediciones.

7.5 Pruebas de funcionamiento

Para comprobar el funcionamiento del acondicionador y del sensor de presión, se introdujo el sensor en un contenedor con agua. Posteriormente, mediante un tubo se empujó hasta el fondo en posición vertical, con el fin de garantizar una medición precisa y evitar desviaciones en la lectura.

Ilustración 95: Acondicionador de Nivel



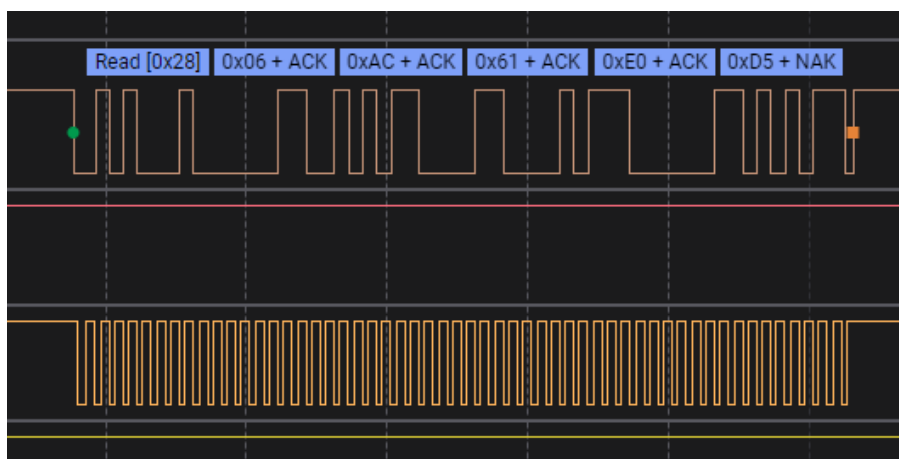
Para la conexión eléctrica se utilizaron cables de medio metro de longitud, lo que permitió que salieran del contenedor y llegaran al acondicionador sin presentar inconvenientes. Una vez realizada la conexión completa, se ejecutó la aplicación para iniciar la adquisición de lecturas provenientes del sensor y visualizar los cálculos correspondientes al nivel de agua.

Ilustración 96: Sensor de presión



Lo primero que se analizó fueron las comunicaciones, para verificar que la transferencia de datos sea correcta. Se utilizó un analizador de estados lógicos que permite observar el envío y la recepción de cadenas por el bus I²C.

Ilustración 97: Trama de datos. Nivel



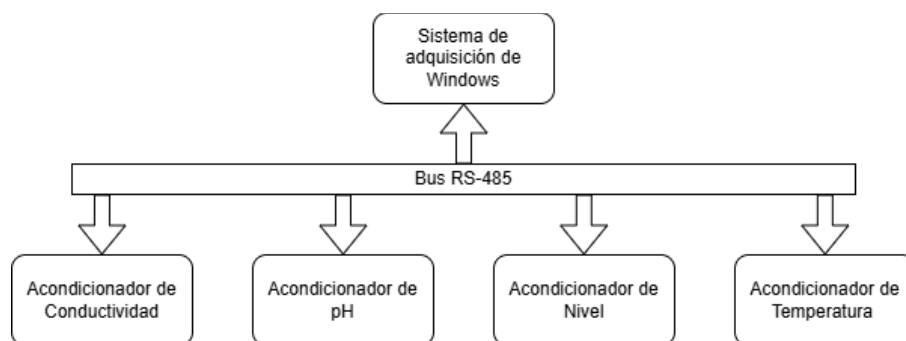
Podemos observar que los datos se reciben eficientemente y que el código los interpreta correctamente. Por lo que se concluye que la programación del acondicionador es correcta y funcional, ya que es capaz de comunicarse con el resto del sistema por medio de comunicación RS-485 y con el sensor por medio de I²C.

Se puede afirmar que el sensor opera de manera correcta y permite obtener valores estables y precisos. Asimismo, se concluye que tanto la programación como el diseño del acondicionador fueron adecuados, ya que cumplen con la tarea de procesar las mediciones y entregar resultados confiables.

8 Estación Modular

Hasta ahora se han explicado los cuatro acondicionadores de manera independiente; sin embargo, la idea principal consiste en conformar una estación de medición modular que permita apilar los distintos módulos y obtener lecturas de cada acondicionador de forma conjunta.

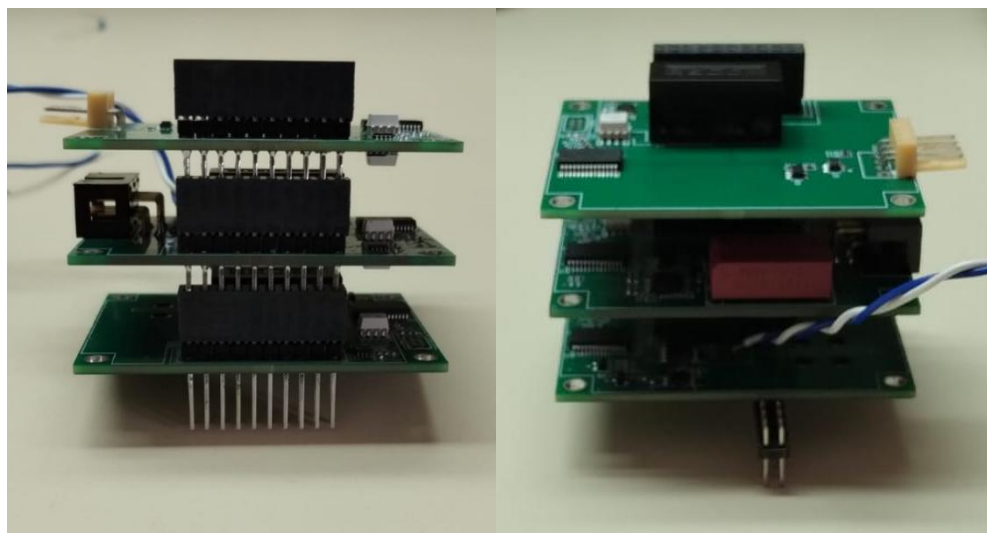
Ilustración 98: Conexión entre los módulos



Los acondicionadores están programados para responder únicamente cuando reconocen un comando válido. Al analizar los comandos específicos de cada módulo se observa que ninguno se repite, lo que garantiza la posibilidad de dirigirse a un acondicionador en particular sin riesgo de que dos o más respondan simultáneamente al mismo comando.

Anteriormente se demostró que los acondicionadores fueron programados y calibrados correctamente (cuando fue necesario), y que son capaces de responder mediante la comunicación RS-485.

Ilustración 99: Acondicionadores acoplados

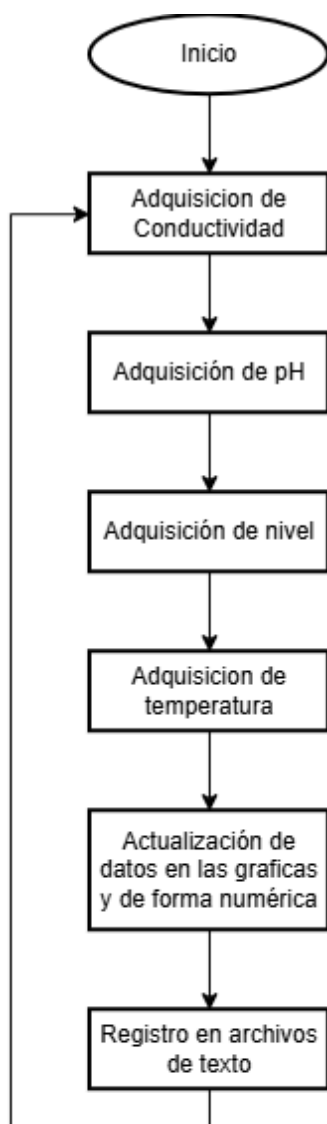


Para integrar los cuatro acondicionadores se desarrolló una aplicación en LabVIEW, la cual envía los comandos específicos de cada módulo de manera ordenada, permitiendo realizar los muestreos y obtener los valores medidos.

La aplicación está configurada para transmitir los comandos cada 30 minutos, dado que las variables monitoreadas presentan cambios lentos en el tiempo. No obstante, el intervalo de muestreo puede ajustarse —ya sea incrementando o reduciendo la frecuencia— según las necesidades del usuario.

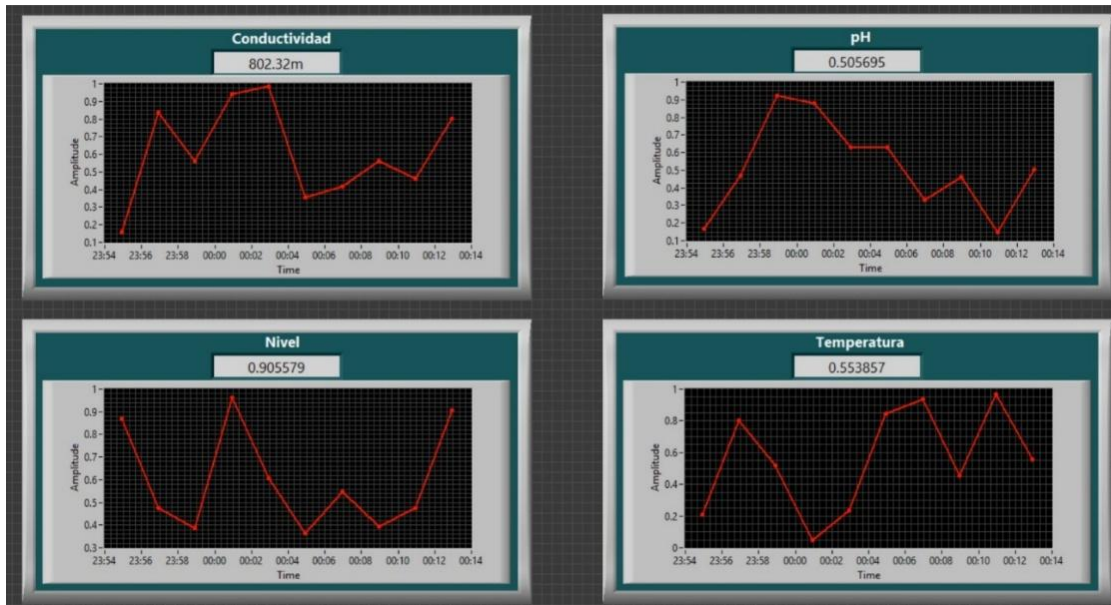
A continuación, se muestra el diagrama de flujo que explica el proceso que realiza la aplicación para obtener lecturas y mostrarlas de forma coordinada en la aplicación, además de registrar dichos datos en los archivos de texto, para general un historial.

Ilustración 100: Proceso de adquisición de datos



Además, la aplicación despliega en gráficas las últimas 10 mediciones, lo que facilita la observación del historial reciente. De manera complementaria, se muestra en pantalla el valor numérico correspondiente al último muestreo.

Ilustración 101: Aplicación general de la estación



Lo más relevante es la capacidad de la aplicación para generar documentos de texto en los que se almacenan todas las mediciones, lo que permite construir un historial ordenado y fácilmente consultable.

La aplicación crea automáticamente un nuevo archivo al inicio de cada día, es decir, exactamente a las 00:00 horas, con el fin de registrar las mediciones correspondientes.

El esquema de nombrado de los archivos generados sigue la estructura:

XX_AAAA_MM_DD.txt

donde *XX* corresponde al número hexadecimal de la estación, *AAAA* al año, *MM* al mes y *DD* al día de la medición.

De esta forma los archivos se organizan de forma ordenada, como se muestra a continuación:

Ilustración 102: Archivos de texto. Estación

AA_2026_06_20
AA_2026_06_21
AA_2026_06_22
AA_2026_06_23
AA_2026_06_24
AA_2026_06_25
AA_2026_06_26
AA_2026_06_27
AA_2026_06_28

Dentro de los archivos, los datos se almacenan en un formato que permite su posterior representación gráfica, en caso de ser necesario.

Cada documento se inicializa con una cabecera y, posteriormente, se añaden los valores medidos junto con la hora de adquisición correspondiente.

A continuación, se presenta un ejemplo que demuestra el correcto almacenamiento de los datos, así como el cambio automático de archivo al iniciar un nuevo día.

Ilustración 103: Ejemplos de archivos de texto. Estación

AA_2026_06_19.txt

AA_2026_06_20.txt

Archivo

Editar

Ver

H1

Hora

Conductividad

pH

Nivel

Temperatura

11:48 p. m.

0.1446

0.4570

0.3323

0.7899

11:50 p. m.

0.4263

0.3611

0.8791

0.2968

11:52 p. m.

0.6027

0.3072

0.5418

0.0136

11:54 p. m.

0.1592

0.1670

0.8689

0.2061

11:56 p. m.

0.8353

0.4721

0.4753

0.8002

11:58 p. m.

0.5606

0.9228

0.3878

0.5211

AA_2026_06_19.txt

AA_2026_06_20.txt

Archivo

Editar

Ver

H1

Hora

Conductividad

pH

Nivel

Temperatura

12:00 a. m.

0.9445

0.8791

0.9626

0.0489

12:02 a. m.

0.9832

0.6316

0.6084

0.2337

12:04 a. m.

0.3528

0.6271

0.3621

0.8463

12:06 a. m.

0.4183

0.3293

0.5463

0.9370

12:08 a. m.

0.5600

0.4588

0.3952

0.4549

12:10 a. m.

0.4625

0.1504

0.4764

0.9687

12:12 a. m.

0.8023

0.5057

0.9056

0.5539

Con lo anterior se concluye que la programación de cada acondicionador es adecuada, ya que responden correctamente a los comandos y realizan las mediciones de manera confiable.

Asimismo, se demuestra que el diseño de la estación modular es eficaz, pues se encuentra completamente funcional y cumple con los objetivos planteados en el proyecto.

8.1 Consideraciones para la instalación en campo

Una vez que el equipo esté finalizado, deben considerarse ciertas precauciones para su instalación en las lagunas de tratamiento, ya que estas suelen presentar condiciones extremas y altamente agresivas para cualquier equipo de medición.

Además, se deberá hacer uso de recubrimientos protectores en los circuitos impresos, como las siliconas hidrofóbicas, que forman una película flexible y dieléctrica capaz de repeler la humedad, proteger contra condensación y evitar cortocircuitos por contaminación. Estas siliconas ofrecen una excelente resistencia térmica y mecánica, lo que las convierte en una opción adecuada para ambientes agresivos como los de aguas residuales, además que para nuestro caso es posible de remover para realizar mediciones y mantenimiento a las tarjetas electrónicas.

Es importante señalar que resulta muy complicado detener por completo los efectos causados por las condiciones extremas de las lagunas, tales como la formación de incrustaciones minerales y orgánicas sobre los sensores y estructuras. La mejor solución es establecer un programa de mantenimiento continuo, que incluya limpieza periódica, inspección de recubrimientos y sustitución preventiva de componentes, con el fin de evitar incrustaciones persistentes y daños irreversibles en el equipo de medición.

A continuación, se describe el tipo mantenimiento que se propone a cada sensor:

- Sensor de nivel: el sensor de presión está fabricado en cuerpo de acero inoxidable 316L, lo que garantiza resistencia a la corrosión y durabilidad en ambientes agresivos. Asimismo, cuenta con una protección contra descargas electrostáticas, que refuerzan la seguridad del sistema frente a variaciones eléctricas. Sin embargo, es importante realizar mantenimiento continuo ya que, si el sensor se encuentra obstruido, arrojará mediciones erróneas.
- Sensor de pH: debe considerarse que este tipo de sensores se desgasta por su propio uso, pues funcionan de manera similar a una batería electroquímica: generan una diferencia de potencial que con el tiempo se degrada. Por ello, tienen una vida útil finita y requieren reemplazo periódico para mantener la confiabilidad de las mediciones
- Sensor de conductividad: es fundamental mantener la sonda limpia, ya que la acumulación de incrustaciones minerales u orgánicas, así como de contaminantes, puede provocar lecturas erróneas. Una limpieza periódica es esencial para garantizar la precisión de los datos obtenidos.
- Sensor de temperatura: no es tan propenso a dañarse debido a que se encuentra protegido, aunque resulta importante verificar que permanezca libre de contaminantes. La acumulación de residuos en su superficie puede modificar las mediciones y afectar la confiabilidad del sistema.

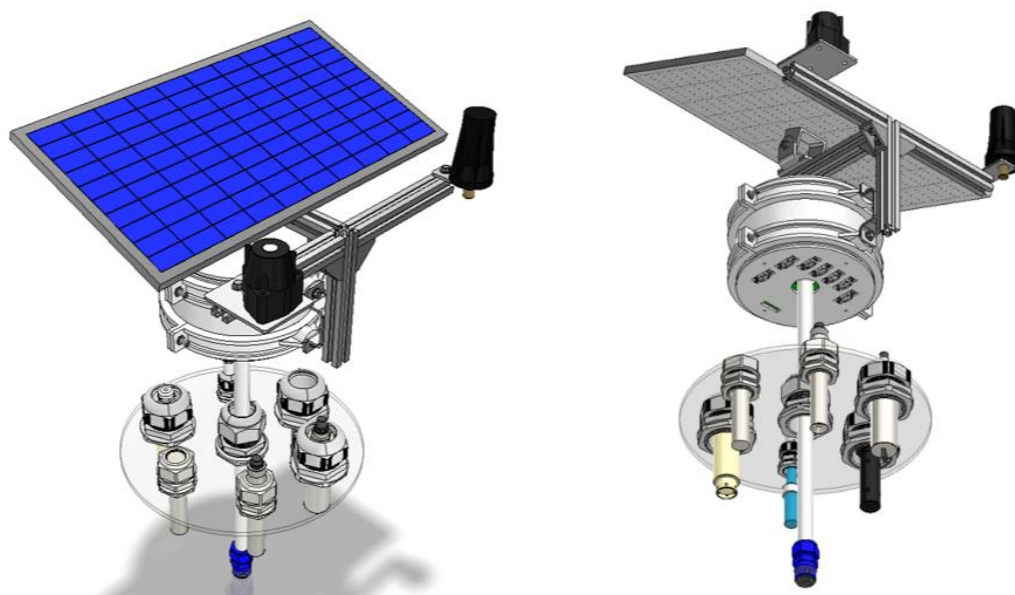
Trabajo futuro

En el futuro se espera incrementar la funcionalidad del proyecto mediante la implementación de múltiples estaciones capaces de comunicarse de forma inalámbrica a través de tecnología LoRa.

Además, se está trabajando para que la estación sea capaz de alimentarse mediante paneles solares, lo que aumentará la eficiencia energética y la sustentabilidad del proyecto.

A continuación, se muestran los modelos de proyección a futuro, para que se entienda como se busca finalizar el proyecto.

Ilustración 104: Modelos de proyección a futuro



Con estas mejoras será posible realizar un monitoreo más amplio y eficiente en lagunas de gran extensión, garantizando la cobertura de áreas que actualmente resultan difíciles de supervisar con una única estación.

Conclusiones

Se logró diseñar, construir y probar cada acondicionador propuesto, obteniéndose resultados que demuestran su correcto funcionamiento de manera independiente. Posteriormente, los módulos fueron acoplados para conformar la estación modular, en la cual se realizaron pruebas periódicas de las cuatro variables. A partir de estos resultados se concluye lo siguiente:

El diseño modular de la estación constituye una solución tecnológica accesible y adaptable a las necesidades específicas del Instituto de Ingeniería. Esta característica permite minimizar tanto los costos de instalación como los requerimientos de mantenimiento, al tiempo que facilita la expansión futura del sistema.

Los circuitos comunes presentes en cada acondicionador —alimentación, comunicaciones y conexiones de programación— constituyen la base sobre la cual es posible diseñar futuros módulos de manera estandarizada.

En particular, el circuito de comunicaciones demostró ser fundamental para mantener aislados los distintos acondicionadores, evitando la aparición de corrientes parásitas que podrían afectar la precisión de las mediciones analógicas de los sensores.

La programación de cada acondicionador resultó adecuada, ya que permitió dotar de funcionalidad a cada módulo. Se implementaron correctamente funciones esenciales como la calibración, el sistema de comunicaciones y la lectura de datos.

En particular, el sistema de comunicaciones fue especialmente efectivo, pues se estableció un estándar basado en comandos específicos aplicable a todos los acondicionadores. Este mecanismo posibilita dirigir instrucciones a una estación y a un módulo en particular sin interferir con el resto, garantizando así la integridad de las mediciones. Además, este enfoque facilita la réplica y el desarrollo de futuros módulos, requiriendo únicamente modificaciones mínimas.

La aplicación general de la estación demuestra su funcionalidad al permitir el monitoreo automático de todas las variables. Asimismo, genera un historial en archivos de texto ordenados y estructurados, lo que facilita la evaluación de las condiciones del medio y la toma de decisiones oportunas para mantener la estabilidad de los procesos biológicos.

Durante el desarrollo de este proyecto enfrenté diversos problemas técnicos y metodológicos que, lejos de ser un obstáculo, me permitieron consolidar gran parte de los aprendizajes adquiridos a lo largo de la carrera. Este proceso contribuyó a mi maduración como ingeniero, al fortalecer mi capacidad de análisis y mi habilidad para la resolución de problemas.

Por otro lado, este proyecto me permitió complementar y ampliar mis habilidades como ingeniero, ya que ahora poseo conocimientos y destrezas en múltiples áreas de la ingeniería electrónica. Entre ellas destacan el diseño de circuitos analógicos y digitales, la programación de microcontroladores para el desarrollo de sistemas embebidos y la creación de aplicaciones en LabVIEW que facilitan la interacción de los usuarios con los proyectos diseñados. Estas competencias no solo consolidan mi formación académica, sino que también me brindan una base sólida para enfrentar nuevos retos profesionales.

Referencias

CONAGUA. (2024). *Estadísticas del agua en México 2023*.

Gallegos, A. (2023, April 17). *Sistemas embebidos: una guía práctica - CRUCE*.
<https://cruce.iteso.mx/sistemas-embebidos-una-guia-practica/>

PIC18F25Q43 | *Microchip Technology*. (n.d.). Retrieved July 31, 2026, from
<https://www.microchip.com/en-us/product/pic18f25q43>.

Schneider, J. (2025, November 26). *Microcontrolador vs microprocesador: ¿Cuál es la diferencia?* | *IBM*. <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/microcontroller-vs-microprocessor>

Von-Neumann vs Arquitectura de Harvard. (2020). <https://teachcomputerscience.com/von-neumann-harvard-architecture/>