

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



TEMA:

“MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS: SENSÓRICA Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Instrumentación

Autor: Cristhian Leonardo Corral Chávez

Director: Prof. Marco Antonio Ciaccia Sortino, PhD

Ibarra - 2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | | | |
|--------------------------------|--|------------------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD | 172345530-7 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES | Corral Chávez Cristhian Leonardo | | |
| DIRECCIÓN: | La Victoria - Ibarra | | |
| EMAIL: | elcorralc@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | 022650-123 | TELÉFONO MÓVIL: | 0961171324 |
| DATOS DE LA OBRA | | | |
| TÍTULO: | Máquina Universal de Ensayos: sensórica y acondicionamiento de señal | | |
| AUTOR: | Corral Chávez Cristhian Leonardo | | |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 13/07/2023 | | |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | | | |
| PROGRAMA: | PREGRADO | | |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniero en Mecatrónica | | |
| ASESOR /DIRECTOR: | Ing. Cosme Mejía / Prof. Marco Ciaccia, PhD | | |

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 13 días, del mes de julio de 2023

EL AUTOR:



Cristhian Corral

**CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Ibarra, 13 de julio de 2023

Marco Ciaccia

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



Prof. Marco Ciaccia, PhD

C.C. 1756778252

DEDICATORIA

A mi madre Amparito por ser compañía consejo y soporte en cada paso, tu presencia siempre está en cada logro, eternamente amado y agradecido. A mis tías por ser soporte en momentos difíciles. A mi hermana que nunca me soltó. A mis primos que hicieron risas en los momentos malos y a Soledad por ser apoyo y refugio en cada paso.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre Amparito Chávez por ser la persona que me formo con valores coraje y respeto, valores que me permitieron desarrollarme. Por ser paciente y amorosa en cada paso, por su apoyo para que tenga siempre lo necesario para formarme y salir adelante.

A mi prima Cinthya que me ayudo en los últimos meses para poder realizar la tesis y culminar la carrera.

A cada uno de mis profesores de la Carrera que aportaron con una idea o concepto para formarme como Ingeniero

A mi tutor Prof. Marco Ciaccia, PhD que tuvo la paciencia para enseñarme, y ser la guía en todo este trabajo impartiendo sus conocimientos y consejos

A mi asesor Ing. Cosme Mejía quien supo mediante sus conocimientos darme las pautas en cada proceso para lograr sacar adelante el trabajo.

RESUMEN

En el presente proyecto se plantea una correcta selección de sensores para el uso de una Máquina Universal de Ensayos (MUE) que tiene como requerimiento el realizar ensayos a tracción y compresión de materiales metálicos según normas ASTM e ISO, que son las encargadas de establecer las características para los distintos sensores. Para contar con una adecuada selección de sensores e instrumentos se utilizó el método de criterios ponderados, que permite realizar una valoración de todos los criterios necesarios para los elementos de la MUE; así, se puede asignar el nivel de prioridad adecuado de cada uno de ellos con respecto al resto, lo que permite conocer qué características son más importantes y cuál solución de todas las planteadas cumple mejor con ellas. Las señales de los sensores son contaminadas por ruido, del ambiente y de la fuente con la que se alimenta a los sensores, por ello en la segunda parte del proyecto se plantea una solución mediante un sistema modular para el correcto acoplamiento de señales que son usadas en la MUE, como celda de carga, *encoder* y extensómetro. Con respecto a los sensores, se eligieron pensando en la máxima capacidad del sistema electromecánico, ya que la máquina estaba sobredimensionada para hasta 600 kN y la selección se lo hizo para 30kN, de igual manera el extensómetro y el *encoder* se eligieron pensando en las normas de los ensayos de materiales. El sistema modular consta de una fuente independiente, únicamente para alimentar sensores y módulos, aquí se usó dos módulos CN6009, para amplificar el voltaje de la fuente y filtrar la señal, con la ayuda de un osciloscopio se visualizó el correcto filtrado de la señal. Se uso también dos módulos AD620, para filtrar la señal de salida de los sensores y amplificarla para su posterior lectura por el PLC. Esta lectura se pudo visualizar en las pruebas realizadas en laboratorio observando que los valores analógicos en la entrada del PLC se amplificaban y variaban según la alteración de la señal emitida por el sensor. Los modulares fueron adaptados en cajas impresas en 3D en las borneras junto al resto del sistema de control de la máquina. Si bien los sistemas modulares ocupan gran cantidad de espacio adaptarlos fue fácil al tener espacio libre en el gabinete de control.

ABSTRACT

This project proposes a proper selection of sensors is proposed for the use of a Universal Testing Machine (UTM) that has the requirement of conducting tensile and compression tests on metallic materials according to ASTM and ISO standards, which establish the characteristics for the different sensors. In order to have an adequate selection of sensors and instruments, the weighted criteria method was used, which allows for an evaluation of all the necessary criteria for the UTM components. This way, the appropriate priority level can be assigned to each of them in relation to the rest, allowing to determine which characteristics are most important and which proposed solution best fulfills them. The sensor signals are contaminated by noise from the environment and the power source that feeds the sensors. Therefore, in the second part of the project, a solution is proposed using a modular system for the proper coupling of signals used in the UTM, such as load cell, encoder, and extensometer. Regarding the sensors, they were chosen considering the maximum capacity of the electromechanical system since the machine was oversized for up to 600 kN, and the selection was made for 30 kN. Similarly, the extensometer and encoder were chosen based on the material testing standards. The modular system consists of an independent power source solely for powering sensors and modules. Two CN6009 modules were used to amplify the voltage from the power source and filter the signal. With the help of an oscilloscope, the correct signal filtering was observed. Two AD620 modules were also used to filter the output signal from the sensors and amplify it for subsequent reading by the PLC. This reading could be visualized in the laboratory tests, observing that the analog values at the input of the PLC were amplified and varied according to the alteration of the emitted signal by the sensor. The modular components were adapted in 3D-printed boxes on the terminals along with the rest of the machine control system. Although the modular systems take up a large amount of space, adapting them was easy due to the available space in the control cabinet.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Planteamiento del Problema | 1 |
| Objetivos | 2 |
| Objetivo General | 2 |
| Objetivos Específicos..... | 2 |
| Justificación | 3 |
| Alcance | 4 |
| CAPITULO 1. MARCO REFERENCIAL | 5 |
| 1.1 Antecedentes..... | 5 |
| 1.2 Marco Teórico | 6 |
| 1.2.1 Máquina Universal de Ensayos | 6 |
| 1.2.2 Ensayos de Materiales | 6 |
| 1.2.2.1 Ensayo de Tracción | 7 |
| 1.2.2.2 Ensayo de Compresión | 7 |
| 1.2.3 Partes de la Máquina Universal de Ensayos..... | 8 |
| 1.2.4 Sistema de Medición | 9 |
| 1.2.4.1 Celda de Carga..... | 9 |
| 1.2.4.2 Sensor de Desplazamiento | 13 |
| 1.2.4.3 Final de Carrera..... | 14 |
| 1.2.5 Normas para Ensayos Mecánicos | 15 |
| 1.2.5.1 ASTM E8/E8M..... | 15 |
| 1.2.5.2 ASTM A370..... | 16 |

| | |
|--|----|
| 1.2.5.3 ISO 527-2 /ASTM D638..... | 16 |
| 1.2.6 Criterios de Sensores | 17 |
| 1.2.6.1 Fidelidad | 17 |
| 1.2.6.2 Precisión..... | 17 |
| 1.2.6.3 Calibración..... | 18 |
| 1.2.6.4 Sensibilidad..... | 18 |
| 1.2.6.5 Exactitud | 18 |
| 1.2.6.6 Alcance | 18 |
| 1.2.6.7 Linealidad Estática..... | 18 |
| 1.2.6.8 Histéresis..... | 19 |
| 1.2.6.9 Resolución..... | 19 |
| 1.2.6.10 Ruido o Interferencia | 19 |
| 1.2.7 Acondicionamiento de Señales | 19 |
| 1.2.8 Sistema Modular | 22 |
| CAPITULO 2. MARCO METODOLÓGICO..... | 24 |
| 2.1 Modelo de Investigación..... | 24 |
| 2.2 Diseño de la Investigación..... | 24 |
| 2.2.1 Evaluar el Estado Actual de la Instrumentación de Datos de la MUE..... | 24 |
| 2.2.2 Determinar los Requerimientos de Instrumentación y Acondicionamiento de Señales con la Finalidad de Realizar Ensayos Mecánicos Bajo Normas ISO/ASTM para Materiales Metálicos y No Metálicos. | 25 |
| 2.2.3 Implementar el Sistema de Acondicionamiento de Señales. | 27 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS..... | 29 |
| 3.1 Especificaciones de la Sensórica para la MUE | 29 |
| 3.1.1 Criterio de Selección de Celda de Carga..... | 29 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.2 | Criterio de Selección para Extensómetro | 32 |
| 3.1.3 | Criterio de Selección para el <i>Encoder</i> | 35 |
| 3.2 | Sistema de Alimentación para el Acondicionamiento de Señales..... | 39 |
| 3.2.1 | Fuente | 39 |
| 3.2.2 | Módulo CN6009..... | 40 |
| 3.3 | Sistema de Acondicionamiento de Señales | 40 |
| 3.3.1 | Módulo AD620 | 41 |
| 3.3.2 | Módulo Anti-rebote..... | 42 |
| 3.5 | Pruebas de Funcionamiento..... | 46 |
| | CONCLUSIONES | 50 |
| | RECOMENDACIONES..... | 51 |
| | REFERENCIAS..... | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Análisis de la resistencia a la tensión en una probeta cilíndrica. | 7 |
| Figura 1.2. Ensayo de compresión en probeta según norma ASTM E9..... | 8 |
| Figura 1.3. Constitución de una MUE. | 8 |
| Figura 1.4. Celda de Carga a Compresión y Tracción de AEP Transducer | 9 |
| Figura 1.5. Clasificación de las galgas extensométricas..... | 11 |
| Figura 1.6. Estructura de las galgas extensométricas | 11 |
| Figura 1.7. Representación del puente de Wheatstone | 12 |
| Figura 1.8. Extensómetro clip-on con bandas extensométricas..... | 13 |
| Figura 1.9. Partes de un encoder..... | 14 |
| Figura 1.10. Finales de carrera marca Bernstein | 14 |
| Figura 1.11. Probeta más usada para norma ASTM E8/E8M | 15 |
| Figura 1.12. Geometrías del espécimen de la norma ASTM A370..... | 16 |
| Figura 1.13. Extensómetro automático de contacto..... | 17 |
| Figura 1.14. Representación gráfica de la histéresis..... | 19 |
| Figura 1.15. Circuito de amplificación para instrumentación | 20 |
| Figura 1.16. Tipos de filtros con su respuesta en frecuencia y sus relaciones de interés | 21 |
| Figura 3.1. Fuente de 5V 5A..... | 39 |
| Figura 3.2. Módulo CN6009..... | 40 |
| Figura 3.3. Módulo AD620..... | 41 |
| Figura 3.4. Filtro pasa banda | 42 |
| Figura 3.5. Módulo anti rebote. a) Módulo diseñado en PCB Wizard. b) Módulo terminado y soldado sus respectivos componentes. | 43 |
| Figura 3.6. Conexión del sistema de acoplamiento de señales. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.7. CAD de caja para módulo AD620. | 45 |
| Figura 3.8. Caja impresa en 3D acoplada al riel Din. | 45 |
| Figura 3.9. Módulos instalados en el tablero de la MUE. | 46 |
| Figura 3.10. Conexión de módulo CN6009 para pruebas. | 47 |
| Figura 3.11. Señal de fuente de 5 V filtrada y amplificada a 10 V observada en el osciloscopio. | 47 |
| Figura 3.12. Conexión de módulo AD620 para pruebas. | 48 |
| Figura 3.13. Conexión módulo AD620 y PLC Siemens S7-1200. | 48 |
| Figura 3.14. Resultado de voltaje del módulo AD620 mostrado en Tia Portal. | 48 |
| Figura 3.15. Señales de entrada y salida del módulo AD620 vista en osciloscopio. | 49 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. Composición de los materiales que constituyen a una galga extensiométrica | 10 |
| Tabla 1.2 Ejemplo de tabla de Criterio vs Criterio | 26 |
| Tabla 1.3 Ejemplos de evaluación criterio-solución..... | 26 |
| Tabla 1.4. Ejemplo de conclusión según los criterios en donde la solución B tiene una ventaja | 27 |
| Tabla 3.1 Soluciones y sus características para celda para carga. | 30 |
| Tabla 3.2 Criterios vs Criterios para priorizar sus pesos para la celda de carga..... | 30 |
| Tabla 3.3. Soluciones evaluadas según criterio de capacidad para la celda de carga. | 31 |
| Tabla 3.4. Soluciones evaluadas según criterio de sensibilidad para la celda de carga..... | 31 |
| Tabla 3.5. Soluciones evaluadas según criterio de costo para la celda de carga. | 31 |
| Tabla 3.6. Soluciones evaluadas según criterio de facilidad de instalación para la celda de carga..... | 32 |
| Tabla 3.7. Análisis de mejor solución para celda de carga tomando en cuenta todos los criterios. | 32 |
| Tabla 3.8. Alternativas para la selección para el extensómetro. | 33 |
| Tabla 3.9. Ponderación de cada criterio para el extensómetro..... | 33 |
| Tabla 3.10. Evaluación del peso específico del criterio de alcance para el extensómetro..... | 34 |
| Tabla 3.11. Evaluación del peso específico del criterio de resolución para el extensómetro. | 34 |
| Tabla 3.12. Evaluación del peso específico del criterio de DAQ para el extensómetro. | 34 |
| Tabla 3.13. Evaluación del peso específico del criterio de costo para el extensómetro. | 34 |
| Tabla 3.14. Análisis de mejor solución tomando en cuenta todos los criterios para el extensómetro. | 35 |
| Tabla 3.15. Alternativas para la selección para el encoder. | 36 |
| Tabla 3.16. Evaluación de criterios para selección para el encoder. | 37 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.17. Evaluación del criterio de resolución para las distintas soluciones para el encoder. | 37 |
| Tabla 3.18. Evaluación del criterio de velocidad para las distintas soluciones para el encoder. | 37 |
| Tabla 3.19. Evaluación del criterio de diseño para las distintas soluciones para el encoder.. | 38 |
| Tabla 3.20. Evaluación del criterio de costo para las distintas soluciones para el encoder.... | 38 |
| Tabla 3.21. Tabla de conclusiones para evaluar las soluciones planteadas para el encoder... | 38 |
| Tabla 3.22. Sensores seleccionados. | 39 |

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del Problema

En la actualidad se ha vuelto imprescindible la supervisión y la alta calidad que debe tener la manufactura. Un aspecto importante es el material por usar, pues proporciona las características mecánicas necesarias para los productos y reduce sus costos teniendo en cuenta la eficiencia del proceso de manufactura de acuerdo con las normativas y estándares de calidad. En ingeniería se denomina MUE al equipo, semeja a una compresora, con el que pueden someterse materiales, componentes o estructuras a ensayo de tracción (tensión) y compresión. Dado que dicha maquinaria permite, además, inducir esfuerzos cortantes y de flexión, recibió ese calificativo para dar idea cabal de su extensa lista de aplicaciones [1]. Por medio de estos ensayos y la información que brindan, el interesado puede seleccionar el material adecuado para cualquier proyecto en las diferentes ramas de la ingeniería, reduciendo recursos, y ayudando a los investigadores a desarrollar nuevos materiales aleados y su respectivo análisis.

En el presente se tienen equipos desarrollados para diferentes materiales, incluso para diferentes ramas de la ingeniería. En general, las MUE generan fuerzas a través de sistemas electromecánicos y, las de mayor capacidad, mediante sistemas hidráulicos u oleodinámicos; posibilitan la aplicación de cargas de compresión y de tracción, y la medición de la resistencia de los especímenes ensayados a una fuerza estática o aplicada lentamente [1]. Por lo tanto, es indispensable la lectura del cambio que se genera en el material al ser sometido a dichos ensayos, de esta forma se pueden elaborar gráficos que representen el comportamiento del material. En las máquinas de este tipo es común encontrar platinas fácilmente intercambiables, mandíbulas (sistemas de sujeción o mordazas) y accesorios para el montaje de los especímenes, así como medidores de deformación (variable solicitada en ensayos como la determinación del módulo de Young) [1]. Otro instrumento usado en las MUE es el extensómetro, este dispositivo permite medir las deformaciones producidas tanto por el alargamiento longitudinal como por el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza aplicada [1].

En la actualidad, la Universidad Técnica del Norte cuenta con una máquina universal de ensayos que tiene una capacidad máxima del sistema hidráulico de 485 234 kN “con base

en el ensayo crítico por compresión de cilindros de hormigón, según la norma técnica ecuatoriana INEN 1573:2010 que proporciona las medidas de las probetas normalizadas para ensayos a compresión” [2]. Sin embargo, la MUE no cuenta con la instrumentación necesaria para su control, y su funcionamiento no tiene validación. Existe una instrumentación que ha sido previamente elegida (celda de carga, interruptores de límite) y la máquina presenta un sistema de control de lazo abierto con acoplamiento de señales por medio del software LabVIEW (NI OPC Servers) [3] que requiere de un computador para procesar las señales, pues necesita una licencia del software que implica un costo adicional al uso de la máquina, al igual que un uso de interfaces extras.

Debido a los problemas destacados anteriormente con la MUE existente en la Universidad Técnica del Norte, se pretende crear una tarjeta electrónica que permita la adecuación de las señales que, al tener sensores con salidas analógicas en mA o mV, no pueden ser leídos directamente por el PLC, como es el caso de las celdas de carga. Se considera el empleo de elementos eléctricos pasivos, ya que requieren un voltaje de entrada (generalmente 10 V CC) para proporcionar una señal eléctrica cuando se aplica fuerza. Además, la señal de salida obtenida generalmente tiene una amplitud muy pequeña y, por lo tanto, los amplificadores de celdas de carga se usan comúnmente para una mejor comprensión de la salida [4]; esto reflejará valores que podrán ser usados para una correcta verificación de los parámetros de las MUE.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar el sistema de acondicionamiento de señales para la máquina universal de ensayos de los laboratorios de Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte.

Objetivos Específicos

- Evaluar el estado actual de la instrumentación de datos de la máquina universal de ensayos.

- Determinar los requerimientos de instrumentación y acondicionamiento de señales con la finalidad de realizar ensayos mecánicos bajo normas ISO/ASTM para materiales metálicos y no metálicos.
- Implementar el sistema de acondicionamiento de señales.

Justificación

Actualmente en la provincia de Imbabura y en la región Norte del país no se encuentra una respuesta a la necesidad de la industria e investigadores de probar diferentes materiales, y la Universidad Técnica del Norte, “en el ejercicio de su autonomía responsable y procurando crecientes niveles de calidad en los procesos y resultados de investigación científica, debe contar con un sistema de investigación planificado en constancia con su misión y visión” [2], que al contar con una MUE puede realizar una mejora con el fin de alcanzar estándares de validación aceptables.

En el presente proyecto se adecuarán las señales de los instrumentos de forma que pueda ser controlada de acuerdo a las características del PLC Xinje instalado en la MUE y acordes a las capacidades que el diseño electromecánico requiera, logrando que la comunicación de entrada de la instrumentación pueda ser controlada y mostrada al usuario, y que así conozca las cualidades mecánicas de cada uno de los materiales con una precisión y de acuerdo a normas de calibración y verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos ISO 7500-1:2018. “Esto con el fin de que pueda ser utilizada para desarrollo de prácticas, análisis de materiales, prótesis y proyectos que se encuentran dentro de la línea de investigación de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, cumpliendo con los estándares requeridos en la certificación de materiales ensayados” [2].

La construcción de una tarjeta de adecuamiento de señales lograra una reducción considerable en el presupuesto de la máquina, en el mercado existen tarjetas de adquisición de datos que incluyen un software logrando el adecuamiento de señales y el control estos dispositivos tienen altos costos y una licencia que debe ser renovada. En la MUE de este trabajo el control ya será realizado por el PLC, por lo que la tarjeta de adecuamiento de señales cumple las necesidades a un costo mucho más reducido.

Alcance

En el presente proyecto, al presentarse la mejora de la máquina universal de ensayos con el sistema electromecánico y al ser limitados los materiales, que serán evaluados según normativas, se pretende hacer una reingeniería para la reelección de instrumentos que estarán de acuerdo con los parámetros establecidos y que cumpla la normativa que existen para los diversos materiales a ensayar. Esta instrumentación tendrá su proceso de validación mediante la creación de una tarjeta de acoplamiento de señales que constará de entradas (celda de carga, extensómetro, codificador, finales de carrera) y de la salida de señales que vayan entre los 5 y 10 V requeridos por el PLC, permitiendo a este generar su control. Es importante tener en cuenta que la tarjeta de adquisición de datos no realizará ningún tipo de control, y que será realizado únicamente por el PLC. Concluida la tarjeta se realizará pruebas utilizando diferentes señales para su posterior verificación y validación.

CAPITULO 1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

En [1] se da a conocer que la Máquina Universal Digital HO11 consta de un sistema de adquisición de datos con código de acceso, esto permite realizar el control de datos de forma segura ya que, además de contar con una tarjeta de adquisición de datos, también genera el envío de datos a un computador que se encarga del control. Para el agarre de la muestra emplea platinas intercambiables, así como mandíbulas y medidores de deformación de diseño compacto y ergonómico. Incluye un control de velocidad preciso en los ensayos, con válvula bidireccional que permite decidir entre tracción o compresión y de un indicador de recorrido máximo fabricado en Italia. Esta máquina es usada para geo materiales, prácticas de Mecánica de Suelos, Ciencia y Polímeros

En la tesis de Lanchimba [2] se especifica que la máquina cuenta con un sistema hidráulico diseñado para ensayos de hormigón que utiliza probetas normalizadas para ensayos de compresión, dando como resultado un valor de soporte de sus cilindros de 50 toneladas según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1573:2010.

Valencia [3] indica que los sensores que se presupuestaron son la celda de carga, el extensómetro y los finales de carrera, y que esta selección se hizo en referencia a las características de la máquina. Para la adquisición de datos y comunicación con el HMI se usó OPC Server de National Instruments por medio de sus canales de comunicación entre sistemas al igual que la conexión con el PLC Xinje.

En la industria actual se presenta comúnmente que en la oferta de estas máquinas estén incluidas sus especificaciones de acuerdo con su capacidad; en el caso de [5] se ofrece una máquina universal de 20 kN que cuenta con un reloj de comparación para medir el alargamiento de la probeta por medio de su desplazamiento, cuenta con un sensor de fuerza y un recorrido electrónico, y para la adquisición de datos los acondiciona y envía a un ordenador para su control.

En [6] se presenta una máquina de la empresa CYM que tiene una capacidad máxima de 20 kN, para materiales metálicos y no metálicos, cuenta con un sensor de carga de radios de alta precisión y un sistema de medición y amplificación de gran rendimiento, garantizando una alta resolución de la fuerza. Se pueden configurar varios sensores de acuerdo con las

necesidades. Para su desplazamiento usa un codificador fotoeléctrico de alta precisión 2500 P/R lo que permite una medición adecuada de la señal. La plataforma de hardware del microordenador procesa los datos con precisión y en tiempo real además de la facilidad de uso de su interfaz de medición y control. Para seguridad incluye protección de límite y tiene protección de sobrecarga, sobre corriente, fuga de electricidad, etc.

En los materiales con tensión uniaxial, y suponiendo un material con resistencia X , ($\sigma = X$ MPa) y tomando en cuenta las dimensiones de una probeta ASTM E8 de 2008, se obtuvo la carga máxima conforme a la ecuación 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Donde σ es el esfuerzo de 700 MPa, A es el área de la sección transversal de la probeta estándar y F es la carga máxima del equipo [7].

1.2 Marco Teórico

El estudio de los materiales ha sido una necesidad que ha cobrado fuerza con el tiempo, por la demanda actual que existe en el mundo, “las cuales han permitido alcanzar los avances tecnológicos que hoy en día se encuentran en la sociedad, requiriendo la construcción de estas nuevas tecnologías que a su vez requieren de materiales que puedan cumplir con las condiciones de uso de éstas” [8].

1.2.1 Máquina Universal de Ensayos

La MUE es similar a una prensa, ya que ejerce una fuerza mediante mordazas encendidas por un sistema electromecánico o hidráulico. Su función principal es obtener las cualidades mecánicas existentes en los materiales ensayados midiendo los desplazamientos y las cargas durante todo el ensayo. Adicionalmente, estos ensayos son muy importantes para el controlar la calidad en un producto.

1.2.2 Ensayos de Materiales

Para conocer las cualidades de los materiales, para lo que se elaboran pruebas de materiales. “Estos involucran pruebas de laboratorio que sirven para determinar: rigidez, resistencia al desgaste, conductividad térmica o eléctrica, acidez, resistencia a la corrosión, densidad, transmisión del sonido, ductilidad, resistencia al impacto, entre otras” [9].

Aunque hay diversos tipos de ensayos, la máquina universal de ensayos realiza únicamente pruebas mecánicas que determinan como sería el desempeño mecánico en los materiales al estar sometidos a diversas cargas.

1.2.2.1 Ensayo de Tracción

Es un tipo de ensayo destructivo, que tiene como función medir la resistencia de un material ante la aplicación de una fuerza de tensión, estática o dinámica. “Esta prueba se considera destructiva porque el material debe pasar por la deformación hasta llegar a la ruptura para obtener sus propiedades mecánicas como: el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último” (Figura 1.1-b). [9]

En (Figura 1.1-a) se observa la medición de una probeta en ensayo de tracción con la ayuda de un extensómetro.

En (Figura 1.1-b) la probeta superior es producto de la ruptura por ensayo de tracción y en la probeta inferior muestra la probeta antes de la prueba. Dando a notar a simple vista la distancia recorrida hasta su ruptura.

Figura 2.1.

Análisis de la resistencia a la tensión en una probeta cilíndrica.



1.2.2.2 Ensayo de Compresión

El ensayo de compresión es una prueba en la que una fuerza es capaz de comprimir o aplastar una probeta hasta que ocurra la ruptura de esta (Figura 1.2). “Es un ensayo muy utilizado en bloques cilíndricos hechos con mezclas de materiales para la construcción de carreteras, como cemento o asfalto”[9] , también es empleado en metales para comprobar la seguridad la durabilidad y la integridad cuando son sometidos a cargas de compresión.

Figura 2.2.

Ensayo de compresión en probeta según norma ASTM E9.



Tomado de: [10]

1.2.3 Partes de la Máquina Universal de Ensayos

“Dependiendo del rango de la fuerza aplicada a las probetas, las máquinas universales se clasifican en hidráulicas y electromecánicas” [9].

La MUE (Figura 1.3) está compuesta por un cabezal que ejerce una fuerza de tracción o compresión en la probeta desplazándose verticalmente con la ayuda de dos tornillos sin fin movidos por un sistema de transmisión acoplado a un motor.

Figura 2.3.

Constitución de una MUE.



Tomado de: [11]

1.2.4 Sistema de Medición

Los sensores forman parte importante en el control de una máquina pues cumplen con el papel de transformar el fenómeno físico del ambiente en señales que pueden ser leídas por el controlador y de esta forma, se pueden tomar decisiones con la información obtenida del ambiente.

Los sensores principales empleados en una MUE son las celdas de carga y los extensómetros, y son complementados por sensores secundarios como sensores de desplazamientos y finales de carrera, entre otros.

1.2.4.1 Celda de Carga

Una celda de carga es un dispositivo de medición utilizado para transformar una fuerza en una señal eléctrica. En su interior se ubica una galga extensiométrica que puede comprimirse si es necesario.

Al ser sometida a una fuerza, la celda deforma la galga provocando variaciones en la resistencia, lo que genera una señal eléctrica procesada por un sistema de control (Figura 1.4).

Figura 2.4.

Celda de Carga a Compresión y Tracción de AEP Transducer.



Tomado de: [12]

- **Galga Extensiométrica**

Se conoce como galga extensométrica al sensor resistivo, que consiste en un alambre fino embebido con placas de polimetilmetacrilato. Las galgas pueden componerse de varios tipos de materiales, como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 2.1.

Composición de los materiales que constituyen a una galga extensiométrica [13].

| Material | Composición |
|-----------------------|------------------------------|
| Nicromo V | 80% Ni, 20% Cr |
| Constantán | 45%Ni, 55% Cu |
| Isoelástico | 55,5% Fe, 36% Ni, 8% Cr |
| Karma | 74% Ni, 20% Cr, 3% Al, 3% Fe |
| Manganina | 84% Cu, 12% Mn, 4% Ni |
| Platino-Iridio | 95% Pt, 5%Ir |
| Monel | 67% Ni, 33% Cu |

Las galgas son usadas para conocer valores de dirección y deformación. La deformación es el resultado de los cambios en la resistencia nominal y sensibilidad. Cuando es comprimida, se conoce como una disminución de la resistencia eléctrica mientras que la elongación es relacionada directamente con el incremento de su resistencia.

“Para calcular las tensiones del material (análisis experimental de tensiones), los valores de deformación se combinan con las propiedades físicas del material, como el módulo de Young (ley de Hooke)” [14].

La galga al generarse la deformación de este alambre, deformando la galga y generando un cambio en la resistencia que se expresa en la ecuación (1.2).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1.2)$$

Dónde:

R : Resistencia (Ω)

ρ : Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)

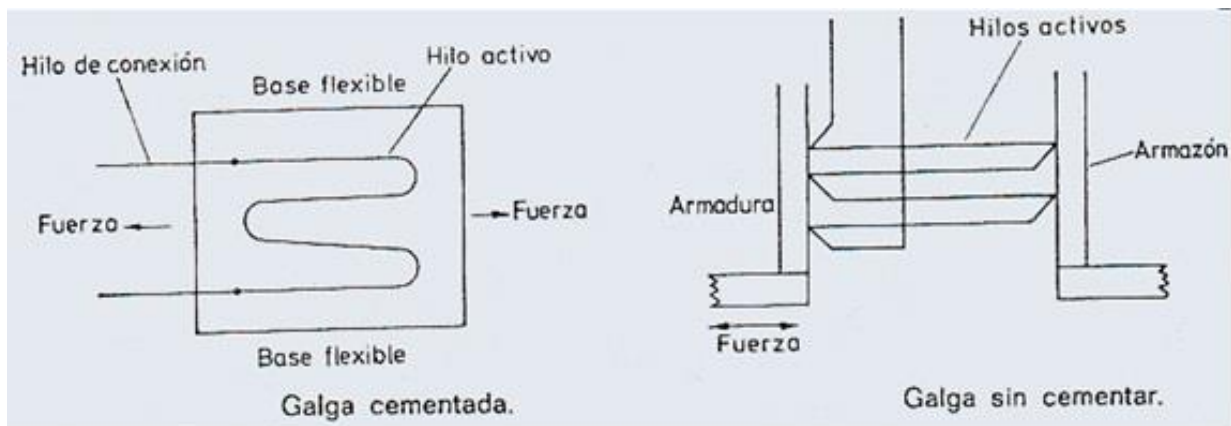
L : Longitud (cm)

A : Área de la sección transversal del conductor (cm^2)

Las galgas se clasifican en cementadas, formada por varios hilos finos en su interior pegados a una hoja base en cerámica, plástico y papel, y las galgas sin cementar, que ubica los hilos entre la estructura fija y otra móvil bajo tensión inicial [15].

Figura 2.5.

Clasificación de las galgas extensométricas.



Tomado de: [13].

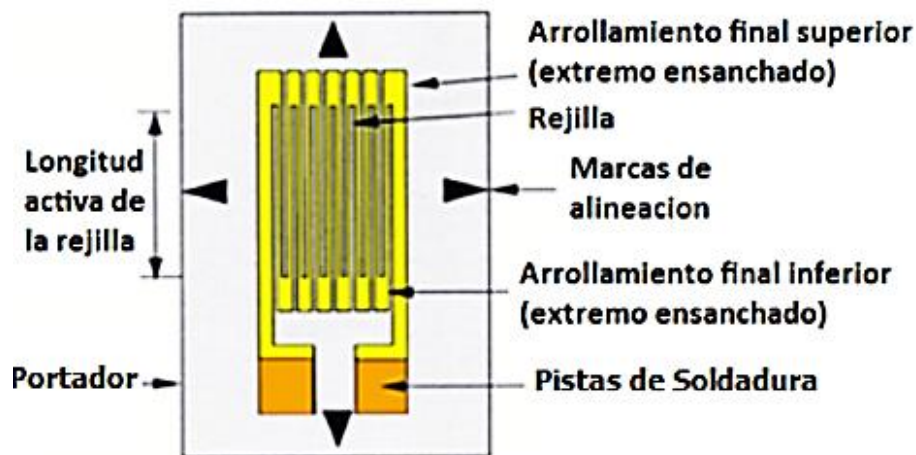
Las galgas extensométricas se pueden pegar a los materiales por dos medios: pegamento industrial o soldadura.

Se utilizan en cualquier campo en los que las mediciones de fuerza o deformación deban ser precisas, siendo estas de tres tipos:

- Estáticas: Estructuras sometidas a cargas fijas.
- Dinámicas: Acciones de variación rápida como vibración o impacto.
- Mixtas: Estructuras sometidas a cargas de variación rápida.

Figura 2.6.

Estructura de las galgas extensométricas.



Tomado de: [16]

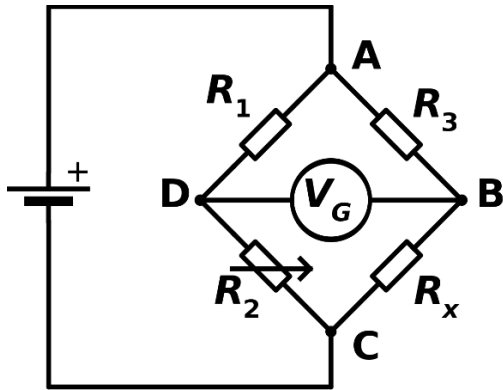
- **Puente de Wheatstone**

El puente de Wheatstone se define como un arreglo de resistencias que permite determinar resistencias desconocidas mediante el equilibrio del puente. Este equilibrio es usado en instrumentación para lograr una calibración correcta y se puede observar en la Figura 1.7 donde existen dos divisores de voltaje. “Los cuatro brazos o ramales del circuito del puente están formados por las resistencias R1 a R4. Los puntos A y C del puente designan las conexiones de la tensión de alimentación del puente entre estos dos puntos. La tensión de salida del puente V_G , es decir, la señal de medida se encuentra disponible en los puntos B y D” [17].

Los puentes de Wheatstone pueden recibir suministro eléctrico por energía continua y de igual forma por energía alterna con la condición de que sean estables.

Si se aplica una tensión de alimentación V_s a los puntos de alimentación del puente A y C, esta tensión se distribuye entre las dos partes del puente, R1, R2 y R3, R4, en proporción a las resistencias correspondientes. En otras palabras, cada mitad del puente actúa como un divisor de tensión. [17].

Figura 2.7.
Representación del puente de Wheatstone.



Tomado de: [17]

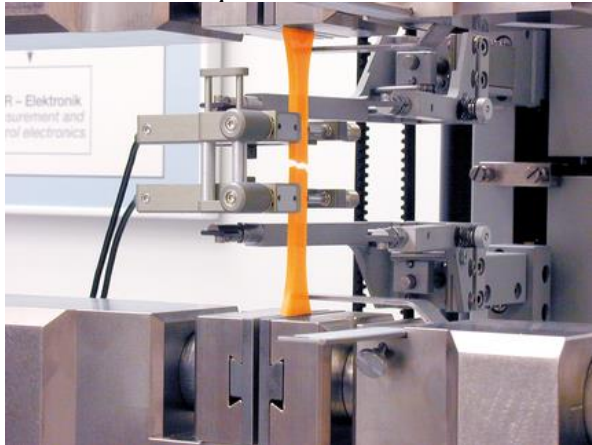
1.2.4.2 Sensor de Desplazamiento

- **Extensómetro**

El extensómetro es un instrumento de uso ingenieril que se fija por sus propios medios a las probetas, como se muestra en la Figura 1.8, con el fin de conocer el estado de los materiales al realizarse pruebas de tracción y compresión, midiendo la variación de la extensión de la probeta. Con esta información se calcula la deformación para obtener propiedades como los límites de fluencia, último y elástico, entre otros [18].

Figura 2.8.

Extensómetro clip-on con bandas extensométricas.



Tomado de: [18]

- **Encoder**

Son sensores digitales que permiten la lectura del movimiento mediante un disco codificador (Figura 1.9) y que son usados frecuentemente para obtener medidas de movimientos lineales, velocidades y posiciones. “Existen disponibles en ambos tipos, uno que responde a la rotación, y el otro al movimiento lineal” [19].

Según el tipo de desplazamiento:

Rotación: La información relativa a la posición angular y “se refiere a la velocidad angular, la posición, el desplazamiento, la dirección o la aceleración” [20].

Traslación: También se los conoce como *encoders* lineales y estos tienen un movimiento longitudinal y su sensor que detecta la posición en el movimiento lineal.

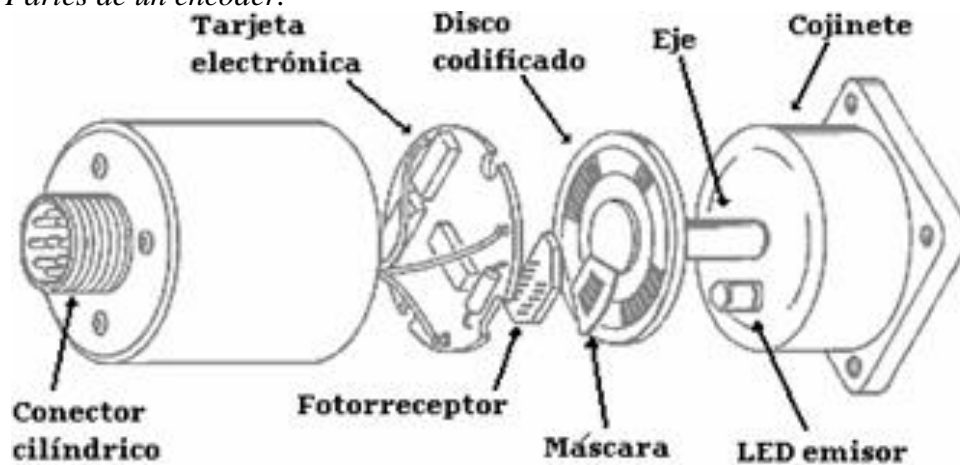
Según el tipo de registro:

Incremental: Mientras se produce el movimiento se generan pulsos; estos pulsos se usan para medir la velocidad o la trayectoria

Absoluto: Se generan *multi-bits* digitales que informan la posición actual, se usan como sensores de corte y de posición o como entrada para el control de velocidad y rango [21].

Figura 2.9.

Partes de un encoder.



Tomado de: [19]

1.2.4.3 Final de Carrera

En un sensor que transmite pulsos en correspondencia con una señal mecánica recibida, como la de un interruptor electromecánico. Esto permite realizar una conexión o desconexión, a partir de accionamientos mecánicos [22] (Figura 1.10).

Figura 2.10.

Finales de carrera marca Bernstein.



Tomado de: [22]

1.2.5 Normas para Ensayos Mecánicos

Las normas son de importancia porque es una forma de evaluar propiedades mecánicas de los materiales sin poner en riesgo el estado de las muestras. “La normativa ASTM ha sido desarrollada como estándares para la realización de ensayos de materiales estableciendo las condiciones y procedimientos más adecuados para la obtención de buenos resultados” [23].

1.2.5.1 ASTM E8/E8M

La norma establece los procedimientos para llevar a cabo ensayos de tracción en materiales metálicos a temperaturas comprendidas entre 10 y 38 grados Celsius (50 - 100 grados Fahrenheit) [24]. Estos ensayos de tracción proporcionan información sobre diversas propiedades de los metales, como el límite elástico, la elongación en el punto de elasticidad, la resistencia a la tracción y la reducción del área, entre otras. La norma abarca ensayos que van desde láminas metálicas de 10 kN hasta chapas de acero de 600 kN.

El cumplimiento de esta norma garantiza resultados confiables y precisos en los ensayos de tracción realizados. Además, al realizar los ensayos de acuerdo con esta norma, se validan las propiedades del material a nivel mundial. Existen varios modelos de probetas utilizados en los ensayos de tracción de metales, siendo el más común aquel con forma rectangular y similar a un hueso, con dimensiones de 12,5 mm de ancho y 50 mm de longitud [24] (Figura 1.11).

Figura 2.11.

Probeta más usada para norma ASTM E8/E8M.



Tomado de: [24]

1.2.5.2 ASTM A370

Esta norma establece métodos para ensayos de tracción de metales. A diferencia de la ASTM E8 esta se refiere a especímenes como barras, tubos, sujetadores, alambres y piezas redondas de acero inoxidable maquinado que necesitan una fuerza de 300 kN para su ensayo, hasta productos tubulares de pared gruesa que requieren una fuerza de 2000 kN (Figura 1.12). Todas las probetas de barras laminadas en caliente requieren un instrumento de longitud de calibre de 200 mm para la medición de deformación, dado que representan una sección completa sin mecanizar [25].

Figura 2.12.

Geometrías del espécimen de la norma ASTM A370.



Tomado de: [25]

1.2.5.3 ISO 527-2 /ASTM D638

Estas normas se emplean para la medición de propiedades de los plásticos y elastómeros, como resistencia a la tracción, módulo de tracción, alargamiento y relación de Poisson. Especifica las dimensiones de la probeta que debe contar con un espesor de 3,2 mm y 50 mm de longitud [26]. Además, proporciona las características de la MUE necesarias para desarrollar el ensayo de tracción. Algunas de ellas son las velocidades, que van desde 1 hasta 500 mm/min, junto con una fuerza de 10 kN y que en algunos casos puede llegar a los 50 kN

para que se produzca la falla del material. En el uso del extensómetro tiene un error permitido de 0,0002 [mm/mm], “correspondiente a la deformación del 0,02%, o bien con una longitud de medición de 50 mm, un error de trayectoria permitido de 0,01 mm” [25], [26].

Al ser los plásticos y los elastómeros los materiales más dúctiles en el mercado, los extensómetros para su medición (Figura 1.13) tienen una trayectoria vertical de hasta 750 mm y una transversal de 40 mm [27].

Figura 2.13.

Extensómetro automático de contacto.



Tomado de: [27]

1.2.6 Criterios de Sensores

Es importante tener en cuenta al momento de elegir un sensor, la aplicación que tendrá o las características del objeto a detectar, así como las características del medio dónde se encontrará el sensor y el tipo de alimentación que necesita. Es por ello que las características más relevantes para los sensores mencionados en la sección 1.2.4 se detallan a continuación.

1.2.6.1 Fidelidad

Es la habilidad de un instrumento de obtener el mismo valor de una magnitud medida siempre que las condiciones sean las mismas durante las mediciones. La fidelidad requiere que exista una similitud en la toma de medidas y un alto número de cifras significativas [28].

1.2.6.2 Precisión

La precisión en los instrumentos de medida se refiere al valor mínimo de una magnitud que puede ser medido con exactitud, indicado por el símbolo \pm . Este valor representa el margen de error asociado y establece los límites que se encuentra el valor verdadero de la magnitud medida [29].

1.2.6.3 Calibración

La calibración se realiza mediante un procedimiento realizado en condiciones específicas que establecen la relación entre los valores tomados por el instrumento y los valores de patrones correspondientes con la magnitud medida [30].

1.2.6.4 Sensibilidad

También conocido como factor de escala, es una pendiente en la curva de calibración que tiene como salida en unos casos valores constantes y en otros casos no, esto se refleja en la escala de medida [28].

En los sensores lo importante es una alta sensibilidad constante. Al encontrarse errores sistemáticos en las mediciones se opta por medir la misma magnitud en dos aparatos diferentes.

1.2.6.5 Exactitud

Es la capacidad de un instrumento de aproximar el valor medido al valor real. La exactitud de un instrumento depende de la calibración estática, que consiste en mantener todas las entradas a un valor constante exceptuando una, esta entrada se varía lentamente tomando valores conocidos dentro del margen de medida. La curva de calibración se define a partir de los valores de entrada y salida obtenidos [28].

1.2.6.6 Alcance

Se conoce como alcance de medición al conjunto de valores de medida en el que el error está dentro de los límites aceptados. Por otro lado, el alcance nominal hace referencia al intervalo de medidas en el que funciona el instrumento, es decir los límites inferior y superior de la escala [30].

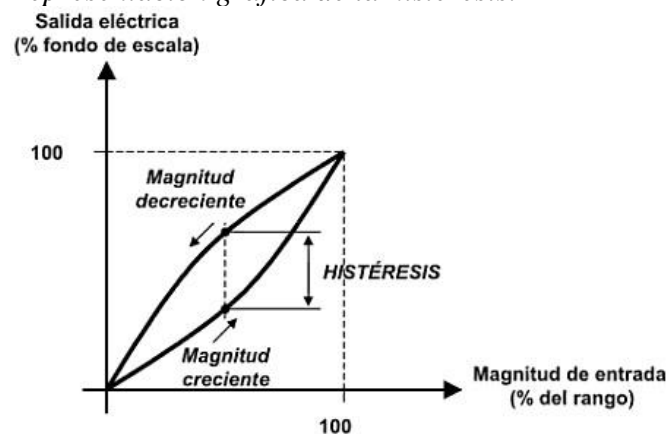
1.2.6.7 Linealidad Estática

Esta propiedad varía según las condiciones ambientales. A la diferencia entre la curva de salida real del sensor en condiciones reales y a la curva teórica proporcionada por el fabricante en condiciones controladas, se le conoce como desviación del sensor. Cuando esta desviación está presente, se expresa en forma de porcentaje indicando la distancia entre curva del sensor y el valor máximo en la escala completa [31].

1.2.6.8 Histéresis

Es la capacidad del sensor para continuar la curva de salida ideal aún cuando la variable presenta cambios. “La diferencia entre histéresis y linealidad es que cuando un sensor presenta histéresis significa que la tendencia de salida cruza en ambos sentidos a la curva de salida ideal” (Figura 1.14) [31].

Figura 2.14.
Representación gráfica de la histéresis.



Tomado de: [32]

1.2.6.9 Resolución

Se considera a la menor diferencia entre los indicadores de un dispositivo, en otras palabras, es la mínima apreciación de un instrumento de medición. En los sensores que ocupan indicadores digitales es el cambio del dígito más pequeño cuando da un paso [30], [31].

1.2.6.10 Ruido o Interferencia

El ruido es considerado como el conjunto de señales eléctricas externas que afecta al sistema de medida. Sin embargo, este problema no solo se encuentra en sistemas electrónicos pues de igual forma se presenta en sistemas con otras funciones. La reducción del ruido es posible mediante técnicas de acoplamiento de señales indeseadas al circuito o sistema [28].

1.2.7 Acondicionamiento de Señales

El acondicionamiento de señales consiste en elementos del sistema de medida que convierten una señal de salida de un sensor electrónico en una señal capaz de registrarse o procesarse posteriormente. Normalmente son circuitos de amplificación, filtrado y modulación o demodulación [28].

En caso de que la salida del sensor es analógica, se requerirá un convertidor análogo a digital (A/D) el cual tendrá una impedancia de entrada limitada. Por esto se necesita una señal continua o que tenga una frecuencia de variación lenta, y que su amplitud esté dentro del rango adecuado, normalmente menor a 10V [28].

- **Amplificadores**

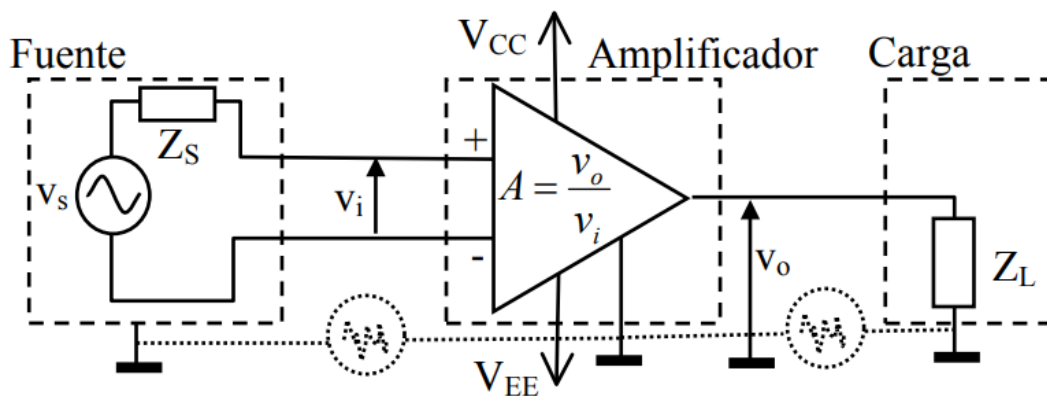
El amplificador es un circuito utilizado para aumentar las señales eléctricas, que comúnmente tienen voltajes muy pequeños, por lo que la señal necesita aumentarse hasta poder ser usada por dispositivos de salida. Para que la señal sea amplificada se debe incrementar su amplitud de entrada mediante una corriente de polarización en el transistor de salida.

Estos amplificadores utilizan elementos activos, como tubos de vacío o transistores. Con los transistores se diseñan circuitos más complejos con la función de amplificar la corriente, como los amplificadores operacionales. Estos, en conjunto con fuentes y filtros, pueden formar amplificadores de instrumentación, como se muestra en la Figura 1.15 [33].

Los amplificadores para instrumentación se llaman amplificadores diferenciales tensión-tensión, su ganancia es precisa y en general son optimizados para operar aún en las peores condiciones. En los sistemas de medida el amplificador de instrumentación consta como un bloque funcional independiente de los demás elementos. Para ello es necesario que sus características funcionales sean precisas y estables, y a su vez no sean modificadas cuando se ensamblan otros elementos.

Figura 2.15.

Circuito de amplificación para instrumentación.



Tomado de: [33]

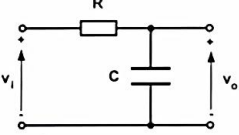
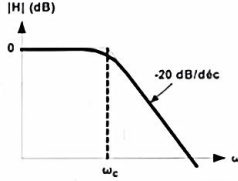
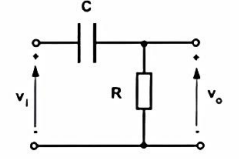
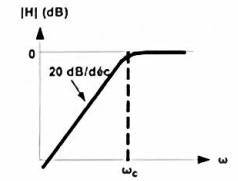
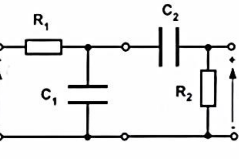
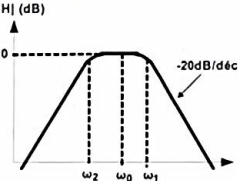
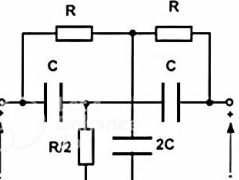
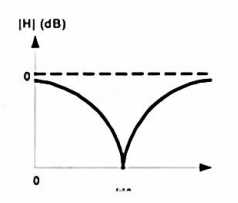
- **Filtros**

Un filtro es un circuito especializado en permitir el paso de señales en un rango de frecuencias mientras evita el paso de otras, separando o suprimiendo las señales que se encuentran fuera de las características deseadas. Existen diseños tanto para entradas analógicas como para señales digitales. Los filtros analógicos pueden tomar valores dentro de un intervalo, a diferencia de los filtros digitales que solo toman valores discretos.

Existen diferentes tipos de filtros según la necesidad específica destacando cuatro principales mostrados en la Figura 1.16. “Los filtros digitales operan en el dominio de la frecuencia y los filtros analógicos en el dominio del tiempo” [34].

Figura 2.16.

Tipos de filtros con su respuesta en frecuencia y sus relaciones de interés.

| Tipo de filtro | Respuesta frecuencial | Relaciones de interés |
|---|--|---|
| Paso bajo  |  | $H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$ Frecuencia de corte: $f_c = 1/2\pi RC$ $\omega_c = 2\pi f_c$ Frecuencia de corte de n etapas iguales en cascada y aisladas: $f'_c = f_c \cdot \sqrt{2^{1/n} - 1}$ |
| Paso alto  |  | $H(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$ Frecuencia de corte: $f_c = 1/2\pi RC$ $\omega_c = 2\pi f_c$ Frecuencia de corte de n etapas iguales en cascada y aisladas: $f'_c = f_c / \sqrt{2^{1/n} - 1}$ |
| Paso banda  |  | $H(j\omega) = \frac{j\omega \tau_2}{1 + j\omega(\tau_1 + \tau_2 + a\tau_2) - \omega^2 \tau_1 \tau_2}$ $\tau_1 = R_1 C_1; \tau_2 = R_2 C_2; a = R_1/R_2$ $\omega_1 = 1/\tau_1; \omega_2 = 1/\tau_2$ Pulsación central: $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$ |
| Rechazo de banda  |  | $H(j\omega) = \frac{j\beta}{4 + j\beta}$ $\beta = \omega/\omega_0 - \omega_0/\omega$ Pulsación central: $\omega_0 = 1/RC$ |

Tomado de: [35]

1.2.8 Sistema Modular

La modularidad en electrónica se refiere a la capacidad de un sistema electrónico para ser dividido en partes independientes, denominados módulos, y conectarlos entre sí como un *puzzle*, formando un hardware de control válido [36]. Los módulos pueden ser intercambiados o actualizados de forma individual, brindando al sistema una fácil reparación y actualización. Por otro lado, reduce los costos, pues al sufrir algún daño es posible cambiar el módulo afectado y no el sistema completo.

Los sistemas electrónicos modulares son muy prácticos pues permiten su personalización, haciendo que el sistema se adecúe a las necesidades del cliente, lo que resulta beneficioso para los usuarios. Por ejemplo, en la industria de telefonía móvil el usuario tiene la posibilidad de reemplazar componentes como la cámara sin tener que cambiar de dispositivo.

Los sistemas modulares están compuestos de componentes electrónicos que pueden ser reemplazados y combinados para lograr sustentar una solución. Los sistemas modulares son

flexibles y con diferentes configuraciones permiten el acople a varias necesidades de un sistema.

CAPITULO 2. MARCO METODOLÓGICO

2.1 Modelo de Investigación

En el presente proyecto se utiliza una investigación aplicada, ya que su finalidad es resolver el problema del desarrollo de un sistema de acondicionamiento de señales para una MUE. Además, se realiza una investigación documental a través de la exploración de bases de datos de artículos científicos y catálogos comerciales en busca de información, así como una investigación de campo realizando una inspección de la máquina existente en los laboratorios de la UTN. Se determinó que el sistema hidráulico presentaba limitaciones en el recorrido de los cabezales, por lo que se decidió cambiar al sistema mecánico para mejorar los ensayos. Además, se identificó un sobredimensionamiento en el sistema de instrumentación y control, ya que solo se requería una fuerza de 30 kN. Para abordar estas problemáticas, se llevó a cabo una investigación experimental y se desarrolló un sistema de acondicionamiento específico, el cual fue sometido a pruebas exhaustivas para validar su funcionamiento adecuado. De esta manera, se logró optimizar la máquina y garantizar una realización efectiva de los ensayos en los laboratorios de la UTN.

2.2 Diseño de la Investigación

A continuación, se enumeran las actividades necesarias para alcanzar los objetivos planteados, junto con sus respectivas especificaciones.

2.2.1 Evaluar el Estado Actual de la Instrumentación de Datos de la MUE

Actividad 1: Investigación de la instrumentación elegida en los trabajos previos.

Se recopilarán los trabajos de grado asociadas con la construcción de la MUE de la UTN identificando y evaluando la instrumentación existente y su compatibilidad con un diseño electromecánico.

Actividad 2: Reelección de parámetros para instrumentos según las necesidades nuevas de la máquina.

Posteriormente a la identificación de las necesidades según el diseño se seleccionará la instrumentación necesaria para su correcto funcionamiento.

Actividad 3: Consulta de proveedores actuales y costos de acuerdo con los instrumentos elegidos previamente y los disponibles en el mercado.

Mediante una investigación de campo en relación con los proveedores, en su mayoría internacionales, se evaluarán las diferentes opciones consideradas para la resolución de las necesidades de la máquina, de acuerdo con las proformas obtenidas buscando criterios de beneficio calidad-costos.

2.2.2 Determinar los Requerimientos de Instrumentación y Acondicionamiento de Señales con la Finalidad de Realizar Ensayos Mecánicos Bajo Normas ISO/ASTM para Materiales Metálicos y No Metálicos.

Actividad 1: Selección de los instrumentos que cumplan con criterios de normas ISO/ASTM.

Al tener varias opciones para cumplir con las necesidades de sensorica en la MUE, se usará el método ordinal corregido de criterios ponderados que da a conocer el orden de preferencia basándose en una evaluación global. Concluida la evaluación, el resultado se ordena de acuerdo con las necesidades. “Este método se basa en unas tablas donde cada criterio (o solución, para un determinado criterio) se confronta con los restantes criterios (o soluciones) y se asignan los valores siguientes” [37]:

1 si el criterio (o solución) de las filas es superior (o mejor, $>$) que el de las columnas.

0,5 si el criterio (o solución) de las filas es equivalente ($=$) al de las columnas.

0 Si el criterio (o solución) de las filas es inferior (o peor, $<$) que el de las columnas.

“Luego, para cada criterio (o solución), se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios (o soluciones) al que se le añade una unidad (para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula); después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio (o solución). Finalmente, la evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio” [37].

- **Pasos para la Aplicación del Método de Criterios Ponderados.**

1. Evaluación de la prioridad de cada criterio (tabla 2.1).

Tabla 2.1

Ejemplo de tabla de Criterio vs Criterio [37].

| Criterio1 > Criterio2 > Criterio3 = Criterio4 | | | | | | |
|---|----|----|-----|-----|------------|---------------|
| Criterios | C1 | C2 | C3 | C4 | $\Sigma+1$ | % ponderación |
| C1 | | 1 | 1 | 1 | 4 | 0,4 |
| C2 | 0 | | 1 | 1 | 3 | 0,3 |
| C3 | 0 | 0 | | 0,5 | 1,5 | 0,15 |
| C4 | 0 | 0 | 0,5 | | 1,5 | 0,15 |
| suma | | | | | 10 | 1 |

2. Ejemplo de evaluación de cada solución disponible con respecto al criterio 1 (tabla 2.2).

Tabla 2.2

Ejemplos de evaluación criterio-solución [37].

| Solución B > Solución A = Solución C > Solución D > Solución E | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| Criterio1 | Solución A | Solución B | Solución C | Solución D | Solución E | $\Sigma+1$ | % |
| Solución A | | 0 | 0,5 | 1 | 1 | 3,5 | 0,23 |
| Solución B | 1 | | 1 | 1 | 1 | 5 | 0,33 |
| Solución C | 0,5 | 0 | | 1 | 1 | 3,5 | 0,23 |
| Solución D | 0 | 0 | 0 | | 1 | 2 | 0,13 |
| Solución E | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0,06 |
| Suma | | | | | | 15 | 1 |

Esta evaluación se realizará para cada criterio que se eligió evaluar según las necesidades y normas presentes para la MUE.

3. Tabla de conclusiones con respecto a todos los criterios y soluciones (tabla 2.3).

Tabla 2.3.

Ejemplo de conclusión según los criterios en donde la solución B tiene una ventaja [37].

| Conclusión | C1 | C2 | C3 | C4 | Σ | Prioridad |
|------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------|-----------|
| Solución A | $0,233 \cdot 0,40$ | $0,10 \cdot 0,30$ | $0,166 \cdot 0,15$ | $0,300 \cdot 0,15$ | 0,193 | 3=4 |
| Solución B | $0,333 \cdot 0,40$ | $0,10 \cdot 0,30$ | $0,333 \cdot 0,15$ | $0,300 \cdot 0,15$ | 0,258 | 1 |
| Solución C | $0,233 \cdot 0,40$ | $0,30 \cdot 0,30$ | $0,266 \cdot 0,15$ | $0,166 \cdot 0,15$ | 0,248 | 2 |
| Solución D | $0,133 \cdot 0,40$ | $0,30 \cdot 0,30$ | $0,166 \cdot 0,15$ | $0,166 \cdot 0,15$ | 0,193 | 3=4 |
| Solución E | $0,066 \cdot 0,40$ | $0,20 \cdot 0,30$ | $0,066 \cdot 0,15$ | $0,066 \cdot 0,15$ | 0,106 | 5 |

Al concluir el método se tendrá una solución equivalente a la prioridad de los criterios y apta para el cumplimiento de las necesidades de la MUE.

Actividad 2: Configuración de señales simuladas según los instrumentos elegidos para la realización de pruebas.

Una vez que los sensores se elijan de acuerdo con las necesidades y criterios de normas referentes a la MUE, se procede a replicar las señales por medio de circuitos simulados como el puente de Wheatstone o con ayuda de potenciómetros y pulsadores tomando en cuenta los datos del fabricante.

Actividad 3: Planteamiento de requerimientos del sistema con una lista de los componentes a usarse.

Se realiza una división por fases de acuerdo con las señales emitidas, para la adecuación de la señal se elaborará una lista de componente necesarios para el acoplamiento de señales al PLC Xinje, junto con una lista de componentes que se usarán en las distintas fases de la placa.

2.2.3 Implementar el Sistema de Acondicionamiento de Señales.

Actividad 1: Adecuación de módulos para instalación

Conociendo las características de las señales de cada sensor se puede realizar una selección de modulares que permitan el adecuamiento de las señales al PLC amplificando y filtrando. La primera etapa constará de una amplificación y reducción de ruido de forma analógica de la señal que alimentará al sistema, esto quiere decir que por medio de filtros se

logrará disipar el ruido o una parte de él. En la segunda etapa del circuito se amplificará la señal, con ayuda de amplificadores operacionales por lo que se espera tener señales óptimas para ser leídas por el PLC.

Se realizan planos de los módulos y como deseamos que se generen las conexiones tomando en cuenta cada señal de voltaje que exista en los modulares

Actividad 2: Conexión y Montaje de Modulares en el Tablero.

Se adecúan terminales en los módulos para facilitar su conexión y desconexión del sistema y se realizan cajas modeladas en 3D que sirvan de protección para los módulos, para simplificar su montaje en el tablero de la máquina se acoplan borneras con pegamento industrial.

Posterior al montaje se realiza el respectivo etiquetado de cada uno de los cables de acuerdo con el módulo al que pertenece para su fácil reconocimiento y refacción.

Actividad 3: Pruebas de funcionamiento con validaciones de voltaje y señales.

Se conecta un generador de señales a cada una de las entradas de los módulos de acoplamiento. Para validar el funcionamiento se conectan las salidas de los módulos a un osciloscopio y así se evalúa que el voltaje y la calidad de la señal sean los adecuados.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1 Especificaciones de la Sensórica para la MUE

En esta sección se realiza la selección adecuada de sensores para la ejecución de pruebas de ensayo a tracción y compresión para materiales metálicos, como celda de carga, extensómetro y *encoder*. Debido a que los sensores envían señales analógicas y el *encoder*, digitales, se propone un acondicionamiento de las señales mediante un sistema modular que filtre y amplifique la señal, tomando en cuenta que será recibida por un PLC Xinje, que necesita entrada de 0 a 10 V.

3.1.1 Criterio de Selección de Celda de Carga

- **Capacidad:** La norma ASTM A370 especifica una fuerza máxima de 30 kN que es la fuerza que puede ejercer el cabezal medio, el cual se pretende dotar del sistema electromecánico para su funcionamiento.
- **Sensibilidad:** Es necesario que sea constante y alta, para ello el porcentaje de error debe ser mínimo.
- **Costo:** Debe ser asequible para ser adquirida por la UTN.
- **Facilidad de Instalación:** Se requiere que tenga un diseño adaptable al cabezal del medio que existe en la MUE y la disponibilidad de herramientas. Entonces, mientras más fácil es montarla y menos modificaciones tenga que realizarse para poner en funcionamiento la celda de carga, mejor será la facilidad de instalación.

Las soluciones que se presentan a continuación son las que ofrece el mercado y cumplen con los criterios mencionados anteriormente, las características se presentan en la tabla 3.1.

- Solución A: LAUMAS CL5000
- Solución B: Applied Measurements STALC3
- Solución C: Zwick-Roell Xforce K325642

Tabla 3.1*Soluciones y sus características para celda para carga.*

| Alternativas | | Características | | | |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------|--------------|---|
| Celdas de carga | | Costo | Capacidad | Sensibilidad | Facilidad de instalación |
| 1 | LAUMAS CL5000 | \$1 274,40 | 50 kN | $\pm 0,3\%$ | Apoyo nivelado y rígido. Utilizar guainas T acoples herméticos para los cables Diámetros Tornillo central: M24 x 2 Pernos: 8,5 Tornillo central M24 x 3 mm kit cableado par pc USB |
| 2. | McMaster-Carr 3487N256 | \$1 208,57 | 50 kN | $\pm 0,5\%$ | Brida 1 ² y diámetro de 36 mm |
| 3. | Zwick-Roell Xforce K325642 | \$1 520,30 | 30 kN | $\pm 0,2\%$ | |

Tabla 3.2*Criterios vs Criterios para priorizar sus pesos para la celda de carga.*

| CRITERIO | Costo | Capacidad | Sensibilidad | Facilidad Ins. | $\Sigma+1$ | Pondera. |
|----------------|-------|-----------|--------------|----------------|------------|----------|
| Costo | | 0 | 0 | 1 | 2 | 0,2 |
| Capacidad | 1 | | 1 | 1 | 4 | 0,40 |
| Sensibilidad | 1 | 0 | | 1 | 3 | 0,30 |
| Facilidad Ins. | 0 | 0 | 0 | | 1 | 0,10 |
| | | | | Suma | 10 | 1 |

Al evaluar los criterios para la celda de carga en la tabla 3.2 el orden de prioridad se establece de la siguiente forma.

Capacidad > Sensibilidad > Costo > Facilidad de Instalación > Adquisición.

Luego de tener claras las mejores opciones y las prioridades de los criterios, se realiza un análisis de cada solución para todos los criterios necesarios para la celda de carga mencionados anteriormente.

En la tabla 3.3 se presenta la evaluación de cada solución según el criterio de capacidad que se adapta de mejor forma a los 30 kN de fuerza solicitados.

Tabla 3.3.

Soluciones evaluadas según criterio de capacidad para la celda de carga.

| CAPACIDAD | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 0,5 | 0 | 1,5 | 0,25 |
| Solución B | 0,5 | | 0 | 1,5 | 0,25 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución C > Solución A = Solución B

En la tabla 3.4 se presenta la evaluación de cada solución con el criterio de sensibilidad, el cual mientras menor sea el porcentaje, mejores prestaciones tendrá para la máquina.

Tabla 3.4.

Soluciones evaluadas según criterio de sensibilidad para la celda de carga.

| SENSIBILIDAD | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|--------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 1 | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución C > Solución A > Solución B

En la tabla 3.5 se presenta la evaluación de cada solución según el criterio de costo el cual no contempla valores de importación.

Tabla 3.5.

Soluciones evaluadas según criterio de costo para la celda de carga.

| COSTO | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 0 | 1 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 1 | | 1 | 3 | 0,50 |
| Solución C | 0 | 0 | | 1 | 0,17 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución B > Solución A > Solución C

En la tabla 3.6 se proporciona la información ponderada de la facilidad de instalación en cada celda de carga.

Tabla 3.6.

Soluciones evaluadas según criterio de facilidad de instalación para la celda de carga.

| FACILIDAD DE INSTALACIÓN | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Pondera. |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Solución A | | 0 | 1 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 1 | | 1 | 3 | 0,50 |
| Solución C | 0 | 0 | | 1 | 0,17 |
| | | | Suma | 6 | 1 |

Solución B > Solución A > Solución C

Tabla 3.7.

Análisis de mejor solución para celda de carga tomando en cuenta todos los criterios.

| CONCLUSIÓN | Costo | Capacidad | Sensibilidad | Facilidad de instalación | Σ | Prioridad |
|------------|-------|-----------|--------------|--------------------------|----------|-----------|
| Solución A | 0,33 | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 1,25 | 1-3-4 |
| Solución B | 0,50 | 0,25 | 0,17 | 0,50 | 1,42 | 1-4 |
| Solución C | 0,17 | 0,50 | 0,50 | 0,17 | 1,33 | 2-3 |

Solución C > Solución A > Solución B

En la tabla 3.7 se puede observar que en base a las conclusiones obtenidas la solución con mejores prestaciones para la máquina sería la solución C.

3.1.2 Criterio de Selección para Extensómetro

Al igual que para la celda de carga, para el extensómetro se presentará una lista con criterios cumpliendo las normativas ASTM D638 para tracción de metales, ASTM D412 para elastómeros, ASTM D3039 para materiales compuestos y ASTM E8M para metales. Estas normas indican que es necesario velocidades entre 1 y 500 mm/min y una longitud aproximada de 50 mm.

Los criterios de valoración que se consideraron más determinantes fueron:

- **Costo:** El costo debe presupuestarse en un equilibrio de calidad y economía.

- **Alcance:** Debe poder realizar medidas de diferentes materiales para lograr cumplir la mayor cantidad de normas existentes en los materiales.
- **Resolución:** Mientras menor sea la medición tendrá más precisión.
- **Adquisición de Datos (DAQ):** Es recomendable que al ser un equipo de alta gama deba poseer un correcto acondicionamiento de señal para evitar el uso de otro tipo de circuitos extra para su control.

Las soluciones que se presentan a continuación han sido seleccionadas con base en la cantidad de información que ha podido ser recolectada de ellas y que sea satisfactoria para los criterios planteados anteriormente.

- Solución A: ONE-78PT-System.
- Solución B: Extensómetro Epsilon– Modelo 3542.
- Solución C: Electronic Extensometer For Metal Material Tensile St.

Tabla 3.8.

Alternativas para la selección para el extensómetro.

| | Alternativas | Características | | | | |
|---|------------------------------------|-----------------|----------|-------------|------------|--------|
| | | Extensómetro | Costo | Alcance | Resolución | DAQ |
| 1 | ONE-78PT-System | | \$24 065 | 52-500 mm | ±0,5µm | 10 VDC |
| 2 | Extensómetro Epsilon – Modelo 3542 | | \$2 130 | 20 a 80 mm | ±0,5µm | 10 VDC |
| 3 | Instron AutoX750 | | \$4 088 | 10 a 750 mm | ±0,1µm | 220 V |

Tabla 3.9.

Ponderación de cada criterio para el extensómetro.

| CRITERIO | Costo | Alcance | Resolución | DAQ | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|-------|---------|------------|------|----------|----------|
| Costo | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,10 |
| Alcance | 1 | | 1 | 1 | 4 | 0,40 |
| Resolución | 1 | 0 | | 1 | 3 | 0,30 |
| DAQ | 1 | 0 | 0 | | 2 | 0,20 |
| | | | | Suma | 10 | 1 |

Alcance > Resolución > DAQ > Costo

Tabla 3.10.*Evaluación del peso específico del criterio de alcance para el extensómetro.*

| ALCANCE | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Solución A | | 1 | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución C > Solución A > Solución B

Tabla 3.11.*Evaluación del peso específico del criterio de resolución para el extensómetro.*

| RESOLUCIÓN | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Solución A | | 1 | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución C > Solución A > Solución B

Tabla 3.12.*Evaluación del peso específico del criterio de DAQ para el extensómetro.*

| DAQ | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Solución A | | 1 | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución C = Solución A > Solución B

Tabla 3.13.*Evaluación del peso específico del criterio de costo para el extensómetro.*

| COSTO | Solución A | Solución B | Solución C | $\Sigma+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Solución A | | 0 | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución B | 1 | | 1 | 3 | 0,50 |
| Solución C | 1 | 0 | | 2 | 0,33 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución B > Solución C > Solución A

Tabla 3.14.*Análisis de mejor solución tomando en cuenta todos los criterios para el extensómetro.*

| CONCLUSIÓN | Costo | Resolución | Alcance | DAQ | Σ | Prioridad |
|------------|-------|------------|---------|------|----------|-----------|
| Solución A | 0,17 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 1,17 | 2-3-4 |
| Solución B | 0,50 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 1,00 | 1 |
| Solución C | 0,33 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 1,83 | 2-3-4 |

Mediante la Tabla 3.14 en la que se evalúa la ponderación de cada criterio con el peso para cada solución, por lo que se concluye que la solución C es la adecuada para la selección del extensómetro, pues da prioridad a los criterios de alcance, resolución y DAQ, que en la Tabla 3.10 son los criterios con ponderaciones más altas.

3.1.3 Criterio de Selección para el *Encoder*

Se requiere el uso de un *encoder* incremental que permita la lectura del cambio de la distancia que es generada en la probeta, estableciendo como referencia la medida normal de la probeta. El *encoder* incremental genera una cantidad definida de impulsos por revolución, los impulsos recibidos indicaran medidas de distancia angular y lineal recorrida, permitiendo una lectura adecuada del avance de distancia necesario para realizar cualquier ensayo que no esté bajo norma se pretende que se use como un sustituto pobre del extensómetro, pero su función principal es que el PLC sepa la velocidad del cabezal a partir de la distancia recorrida.

Tomando en consideración el cambio de sistema hidráulico a electromecánico, se opta por un *encoder* incremental. Aprovechando la estructura de la máquina el *encoder* puede ser adaptable a algún tipo de piñón que permita conocer la velocidad a la que se desplazan las mordazas. La señal debe permitir la comunicación de sus datos de forma fácil para que pueda ser controlada por el PLC.

Los criterios de valoración que se consideraron más determinantes fueron:

- **Pulsos:** El encoder ocupa un papel determinante en la capacidad de medir la elongación que puede alcanzar un material al estar pasando por un ensayo. Siendo un sistema que considera múltiples materiales, su rango de alcance se vuelve fundamental, ya que permite adaptarse a varios materiales a futuro. Los pulsos del encoder se utilizan para calcular velocidad angular del eje lo que a su vez permite determinar la velocidad lineal o la distancia recorrida.

- **Costo:** Debe equilibrarse en un criterio de calidad y economía.
- **Diseño:** En el diseño se toma en cuenta el eje del encoder y se busca un encoder con el mayor eje pues este tendrá que sujetarse o bien a un sistema de transmisión o bien a un acoplamiento rígido que le permita al encoder una alineación fija con el eje por lo que mientras más grande sea el eje del encoder mejores prestaciones tendrá para la máquina.
- **Resolución:** La resolución se refiere a la cantidad de pulsos de salida que se generan por cada revolución del eje. Una mayor resolución significa que el *encoder* es capaz de detectar cambios de posición más pequeños y precisos en el eje.
- **Velocidad:** Es importante seleccionar un *encoder* con una velocidad nominal adecuada para el sistema. La velocidad nominal del *encoder* debe ser mayor que la velocidad máxima del eje.

La evaluación que se presenta a continuación se refiere a las soluciones que ofrece el mercado actual tomando en cuenta los criterios planteados:

- Solución A: LIKA I58
- Solución B: DBS60B SICK
- Solución C: LIKA I65

Tabla 3.15.

Alternativas para la selección para el encoder.

| Alternativas | | Características | | | |
|--------------|----------------|-----------------|-------------|------------------|-----------------|
| | <i>Encoder</i> | Costo | Diseño (mm) | Resolución (PPR) | Velocidad (rpm) |
| 1 | LIKA I58 | \$292,86 | Ø12 | 10 000 | 12 000 |
| 2 | DBS60B SICK | \$297,07 | Ø16 | 5 000 | 9 000 |
| 3 | LIKA I65 | \$180,00 | Ø12 | 10 000 | 6 000 |

Tabla 3.16.*Evaluación de criterios para selección para el encoder.*

| CRITERIO | Costo | Diseño | Resolución | Velocidad | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|-------|--------|------------|-----------|----------|----------|
| Costo | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,1 |
| Diseño | 1 | | 0 | 0 | 2 | 0,2 |
| Resolución | 1 | 1 | | 1 | 4 | 0,4 |
| Velocidad | 1 | 1 | 0 | | 3 | 0,3 |
| Suma | | | | | 10 | 1 |

Al evaluar los criterios para el *encoder* en la tabla 3.16 el orden de prioridad se establece de la siguiente forma.

Resolución > Velocidad > Diseño > Costo

Tabla 3.17.*Evaluación del criterio de resolución para las distintas soluciones para el encoder.*

| RESOLUCIÓN | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 1 | 0,5 | 2,5 | 0,42 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 0,5 | 1 | | 2,5 | 0,42 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución A = Solución C > Solución B

Tabla 3.18.*Evaluación del criterio de velocidad para las distintas soluciones para el encoder.*

| VELOCIDAD | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 1 | 1 | 3 | 0,50 |
| Solución B | 0 | | 1 | 2 | 0,33 |
| Solución C | 0 | 0 | | 1 | 0,17 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución A > Solución B > Solución C

Tabla 3.19.*Evaluación del criterio de diseño para las distintas soluciones para el encoder.*

| DISEÑO | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 0 | 1 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 1 | | 1 | 3 | 0,50 |
| Solución C | 0 | 0 | | 1 | 0,17 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución B > Solución A > Solución C

Tabla 3.20.*Evaluación del criterio de costo para las distintas soluciones para el encoder.*

| COSTO | Solución A | Solución B | Solución C | $\sum+1$ | Pondera. |
|------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Solución A | | 1 | 0 | 2 | 0,33 |
| Solución B | 0 | | 0 | 1 | 0,17 |
| Solución C | 1 | 1 | | 3 | 0,50 |
| Suma | | | | 6 | 1 |

Solución C > Solución A > Solución B

Tabla 3.21.*Tabla de conclusiones para evaluar las soluciones planteadas para el encoder.*

| CONCLUSIÓN | Velocidad | Resolución | Diseño | Costo | Condiciones Ambientales | Σ | PRIORIDAD |
|------------|-----------|------------|--------|-------|-------------------------|----------|-----------|
| Solución A | 0,167 | 0,267 | 0,2 | 0,133 | 0,067 | 0,833 | 1-2-3 |
| Solución B | 0,111 | 0,107 | 0,3 | 0,067 | 0,027 | 0,611 | 3 |
| Solución C | 0,056 | 0,267 | 0,1 | 0,2 | 0,067 | 0,689 | 2-4 |

Mediante la Tabla 3.21 en la que se evalúa la ponderación de cada criterio con el peso para cada solución, por lo que se concluye que la solución A es la adecuada para la selección del *encoder*, pues da prioridad a los criterios de Velocidad, Resolución y Diseño, que en la Tabla 3.16 son los criterios con ponderaciones más altas.

Al terminar el proceso de selección de los sensores, en la Tabla 3.22 se muestran los sensores de los que se simulará la señal para realizar su respectivo acondicionamiento.

Tabla 3.22.

Sensores seleccionados.

| Sensor | Marca y modelo seleccionado | Costo |
|----------------|-----------------------------|------------|
| Celda de carga | Zwick-Roell Xforce K325642 | \$1 520,30 |
| Extensómetro | Instron AutoX750 | \$4 088 |
| Encoder | LIKA I58 | \$292,86 |
| | TOTAL | \$5 901,16 |

3.2 Sistema de Alimentación para el Acondicionamiento de Señales.

La alimentación en un sistema modular de acondicionamiento tiene como requerimiento que la señal de corriente continua emitida por la misma sea limpia y libre de perturbaciones.

3.2.1 Fuente

Para lograr la independencia del sistema de alimentación del PLC y prevenir cualquier tipo de ruido generado por el PLC, se optó por acoplar una fuente individual para el sistema de acondicionamiento de señal, mostrada en la Figura 3.1. Esta fuente fue seleccionada tomando en cuenta la factibilidad de repuestos al igual que en el costo. Está sobredimensionada, ya que no es necesario más de 1A para la alimentación de todo el sistema. Se tomó en cuenta el tamaño para que pueda ser adaptada de forma fácil al tablero de control de la MUE.

Figura 3.1.

Fuente de 5V 5A.



Tomado de: [38]

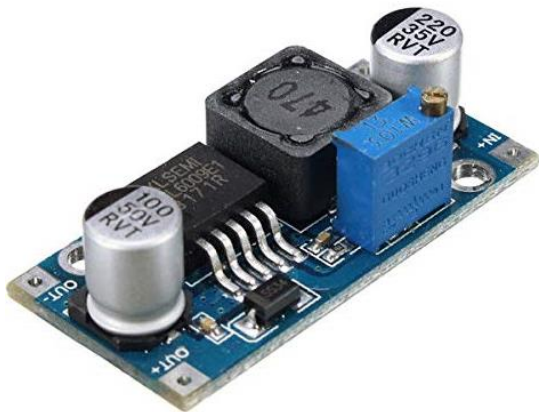
3.2.2 Módulo CN6009

Debido a que el módulo AD620 amplifica de acuerdo con el voltaje con el que se alimente, al tener señales muy bajas en voltaje, es necesario alimentarlo con su máximo voltaje de operación, es decir, 10 V. Sin embargo, se cuenta únicamente con una fuente de 5 V para su alimentación, por lo que para filtrar y amplificar al mismo tiempo se utiliza el módulo CN6009 (Figura 3.2), de tipo *step-up*, que permite aumentar el voltaje de entrada a diferentes niveles de voltaje de salida mediante un potenciómetro. Algunas de sus características son:

- Rango de voltaje de entrada: 3 V - 32 V DC
- Rango de voltaje de salida: 5 V - 35 V DC
- Corriente de salida máxima: 2 A
- Eficiencia de conversión: hasta un 94%
- Frecuencia de conmutación: 400 kHz
- Protección de polaridad inversa: sí
- Protección de sobrecalentamiento: sí
- Dimensiones: 43 mm x 21 mm x 14 mm

Figura 3.2.

Módulo CN6009.



Tomado de: [39]

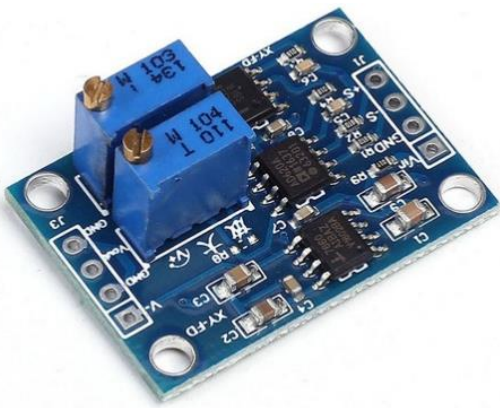
3.3 Sistema de Acondicionamiento de Señales

En el sistema de acondicionamiento se busca que la señal recibida por el instrumento sea amplificada y de forma limpia llegue al PLC para su correcto control y uso por lo que se implementan modulares que cumplan con este objetivo.

3.3.1 Módulo AD620

Para la amplificación de las señales se utiliza el módulo AD620 (Figura 3.3), que es un amplificador de instrumentación de alta ganancia usado comúnmente para mediciones de tensión. Es óptimo para el sistema de adquisición de señales de la MUE, pues es capaz de amplificar señales de entrada muy pequeñas, desde $\pm 100\text{mV}$, hasta niveles útiles para su procesamiento digital o su registro analógico. Gracias a que su salida es lineal, puede ser fácilmente convertida para su lectura en el PLC.

Figura 3.3.
Módulo AD620.



Tomado de: [40]

Su ganancia es programable, es decir se puede ajustar de acuerdo con la necesidad del usuario mediante un potenciómetro, de 1 a 10 000. El AD620 es capaz de proporcionar mediciones muy precisas al tener una resolución de 16 bits, un bajo nivel de ruido y tiempo de establecimiento rápido. Algunas de sus características de presentan a continuación.

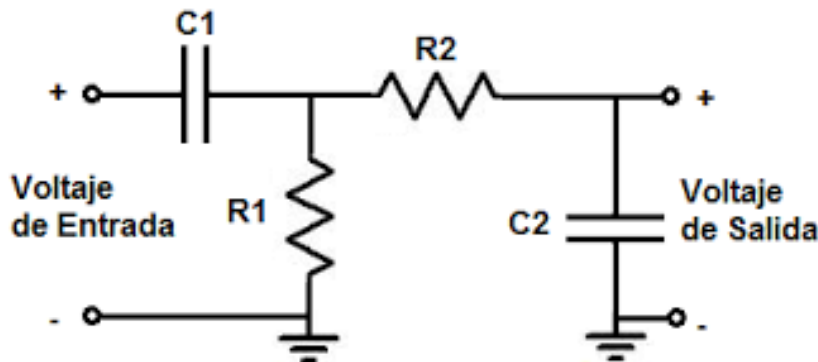
- Chip principal: AD620
- Voltaje de operación: 3 V ~ 12 V DC
- Señal de voltaje en la entrada (V_{in}): 100 μV ~ 300 mV
- Rango de la señal de salida: $\pm (V_{in} - 2 \text{ V})$
- Rango de salida máxima: $\pm 10 \text{ V}$
- Tensión de compensación: 50 μV
- Rechazo del modo común: 100 dB
- Rango de amplificación ajustable: 1,5 ~ 1000
- Cero ajustable mediante trimmer

- Desviación de tensión offset máximo: 0,6 uV / °C
- Dimensiones: 32,3 mm x 22,2 mm x 13,8 mm

Para filtrar la señal, el AD620 utiliza un filtro pasa banda, que como su nombre lo indica, permite el paso de una banda específica de frecuencias, mientras atenúa o elimina las frecuencias fuera de esa banda. Está conformado por dos resistencias y dos capacitores, dispuestos como se muestra en la Figura 3.4, R1 y C1 atenúan las frecuencias superiores a la del corte determinado, mientras que R2 y C2 forman un filtro pasa alto, atenuando las señales inferiores a la frecuencia de corte. La banda de frecuencias que es permitida a través del filtro es el rango de frecuencias entre estas dos frecuencias de corte.

Figura 3.4.

Filtro pasa banda.



Tomado de: [40]

Además, es capaz de rechazar el ruido proporcionando una buena relación señal-ruido. Por otro lado, incluye una protección a la sobrecarga, que ayuda a evitar daños en el circuito.

3.3.2 Módulo Anti-rebote

Este módulo fue elaborado en una baquelita en la que se utilizó el serigrafiado para realizar las líneas de conexión entre los componentes. Posteriormente, se sumergió la tarjeta en cloruro férrico para eliminar el cobre excedente dejando únicamente los caminos necesarios para el circuito. Se debe revisar cada 2 o 3 minutos el proceso de corrosión y al verificar que todo el cobre ha sido desprendido, se enjuaga la tarjeta con agua.

Al obtener el diseño deseado se limpió la tarjeta con alcohol, se lijó y se realizaron las perforaciones necesarias para soldar los componentes que son:

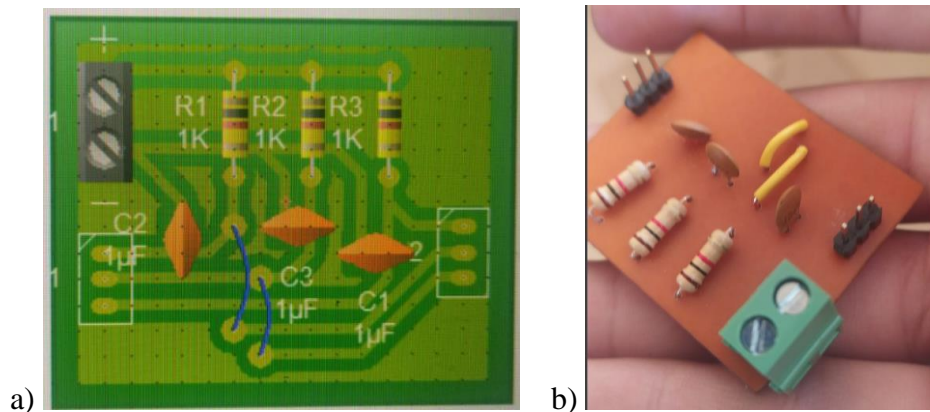
- 3 resistencias de 1 k Ω
- 3 capacitores de 220 pF

El diseño final se muestra en la Figura 3.5. A continuación, se presentan los beneficios de contar con un módulo anti rebote para el control de un *encoder*:

- Evita errores de cuenta.
- Mejora la estabilidad y la precisión del sistema.
- Prolonga la vida útil del *encoder*.
- Acelera la velocidad de respuesta.
- Reduce la interferencia electromagnética.
- Minimiza el ruido y las vibraciones mecánicas.

Figura 3.5.

Módulo anti rebote.



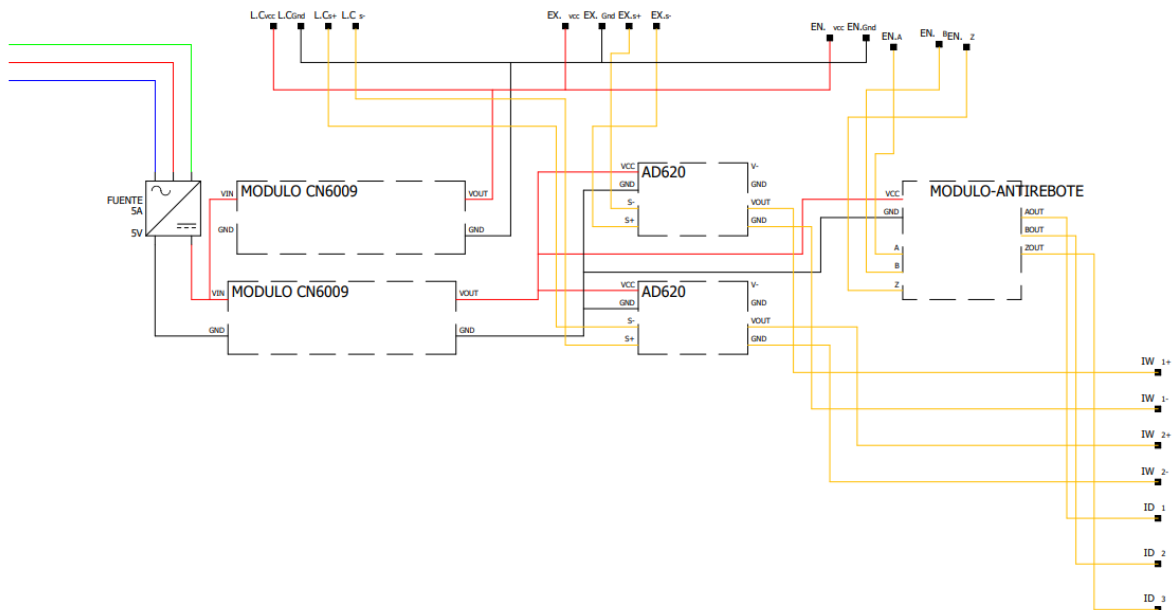
a) Módulo diseñado en PCB Wizard. b) Módulo terminado y soldado sus respectivos componentes.

3.4 Resultados

Es así como utilizando los elementos detallados en 3.2 y 3.3 se construye el sistema, como se muestra en la Figura 3.6.

Figura 3.6.

Conexión del sistema de acoplamiento de señales.



El sistema de acondicionamiento de señales consta de la fuente de voltaje y dos módulos CN6009 para la alimentación. Un módulo eleva el voltaje entre 10 V y 15 V para la alimentación de los sensores, como celda de carga, extensómetro y *encoder*. El otro módulo CN6009 alimenta al resto de componentes del sistema para acondicionar adecuadamente la señal.

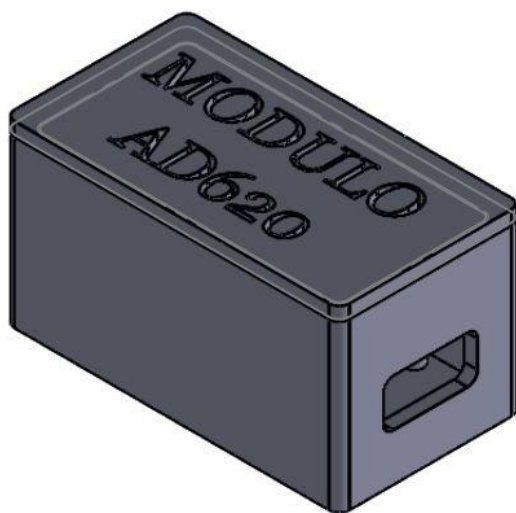
Por otra parte, se encuentran dos módulos AD620. Uno se encarga de amplificar la señal de la celda de carga de 2 mV/V a una señal entre 0 V a 10 V. El otro módulo AD620, amplifica la señal del extensómetro obtenida en mV a un rango entre 0 V y 10 V, igualmente. Estas señales amplificadas y filtradas de los sensores son enviadas al PLC, permitiendo su lectura e interacción con el usuario. Por último, el filtro anti-rebote procesa la señal del *encoder* evitando falsos contactos, efecto del rebote mecánico.

Puesto que el sistema de acoplamiento de señales no es un sistema independiente de la MUE, es necesario adecuarlo para que sea instalado en el tablero de control. Se realizaron diseños CAD de cajas para cada módulo (Figura 3.7), que se fabricaron mediante impresión en 3D, utilizando material PETG, tomando en cuenta las dimensiones de los módulos y de los conectores, en las que se van a colocar cada uno de los módulos para prolongar su vida útil.

El PETG se destaca por su excepcional durabilidad, lo que lo convierte en la elección ideal para numerosas aplicaciones. Su alta resistencia al impacto y su combinación única de rigidez y flexibilidad se deben a su capacidad para adherirse firmemente en cada capa. Además, este filamento ofrece una impresionante resistencia tanto a altas temperaturas como a fuerzas externas. Una ventaja adicional del PETG es su baja susceptibilidad a la absorción de agua, lo que garantiza que mantenga su resistencia a lo largo del tiempo. Además, su notable resistencia a los agentes químicos lo hace aún más versátil y confiable en diversas situaciones.

Figura 3.7.

CAD de caja para módulo AD620.



Estas cajas llevan en la tapa el nombre de cada elemento, impresos en PLA Luminoso (Figura 3.8) para que la identificación sea fácil y rápida para los técnicos y operarios. De igual manera, con la ayuda de pegante *akafix* se realizó la adherencia de las cajas en 3D a varios contactores de riel Din logrando una fuerte unión que permitió colocar las cajas en el riel (Figura 3.9).

Figura 3.8.

Caja impresa en 3D acoplada al riel Din.

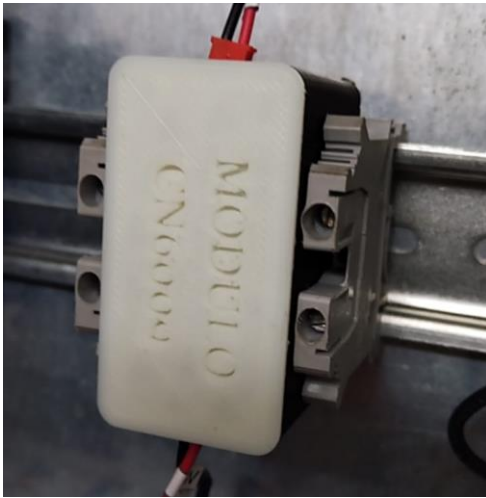
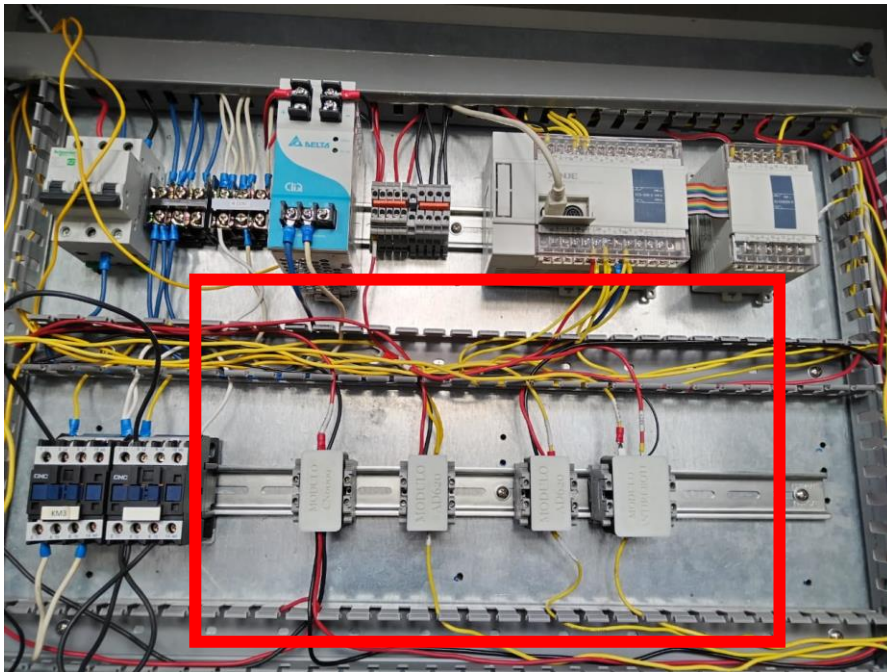


Figura 3.9.

Módulos instalados en el tablero de la MUE.



3.5 Pruebas de Funcionamiento

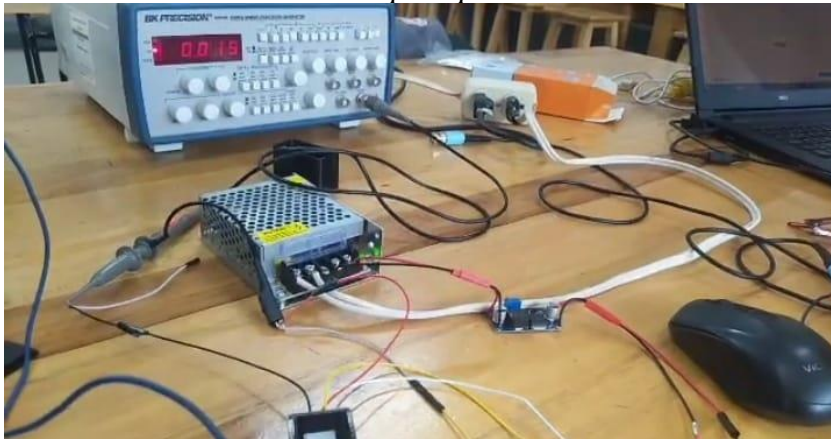
Las pruebas de funcionamiento se realizaron fuera del tablero de control, se utilizó el sistema de acondicionamiento de señales descrito anteriormente, una fuente variable de voltaje, un PLC y un osciloscopio.

Para la primera fase de pruebas se comprobó que la señal de alimentación de los módulos sea la adecuada; para ello se conectó la fuente de 5 V al módulo CN6009.

Posteriormente, se conectaron las salidas de la fuente y del sensor a dos diferentes canales de un osciloscopio, para observar las señales de entrada y salida del módulo (Figura 3.10).

Figura 3.10.

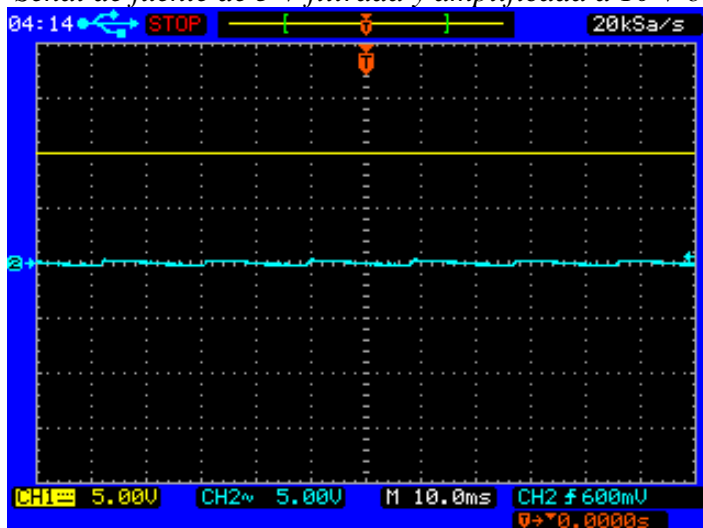
Conexión de módulo CN6009 para pruebas.



Se pudo evidenciar que la señal de entrada tenía mucho ruido, mostrada en la Figura 3.11 de color azul; sin embargo, con la ayuda del módulo la señal fue filtrada y amplificada correctamente, obteniendo los 10 V necesarios para el sistema, mostrada de color amarillo.

Figura 3.11.

Señal de fuente de 5 V filtrada y amplificada a 10 V observada en el osciloscopio.

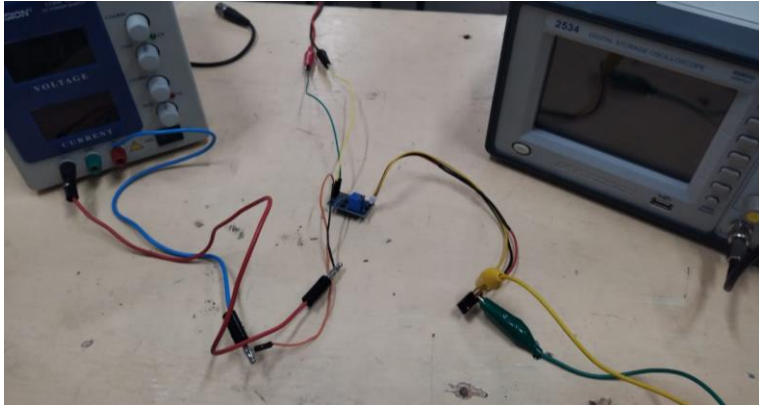


Se llevó a cabo la prueba del módulo AD620 durante la segunda fase, utilizando el sistema de alimentación mencionado anteriormente. Para simular las señales de salida de los

sensores, se empleó una fuente de voltaje variable que generaba valores en mV. La señal de salida de esta fuente se conectó al módulo AD620, asegurándose de respetar la polaridad para su amplificación (Figura 3.12).

Figura 3.12.

Conexión de módulo AD620 para pruebas.



Para comprobar el funcionamiento del módulo AD620 se cargó un programa con la ayuda de Tia Portal V16 en un PLC Siemens S7-1200 y se conectó la salida del módulo al PLC (Figura 3.13), mostrando valores amplificados correctamente y que podían ser leídos en un rango de 0 a 10 V (Figura 3.14).

Figura 3.13.

Conexión módulo AD620 y PLC Siemens S7-1200.

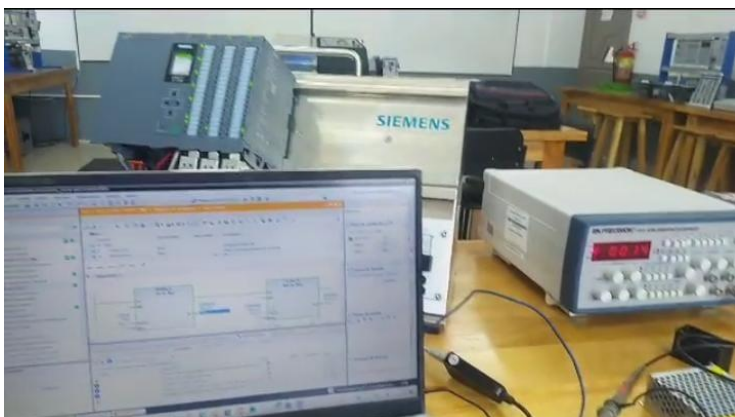
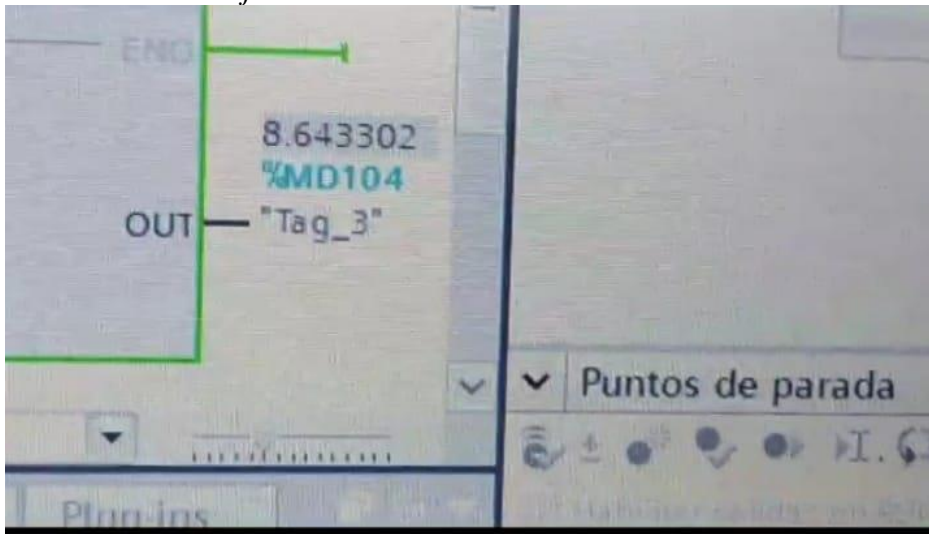


Figura 3.14.

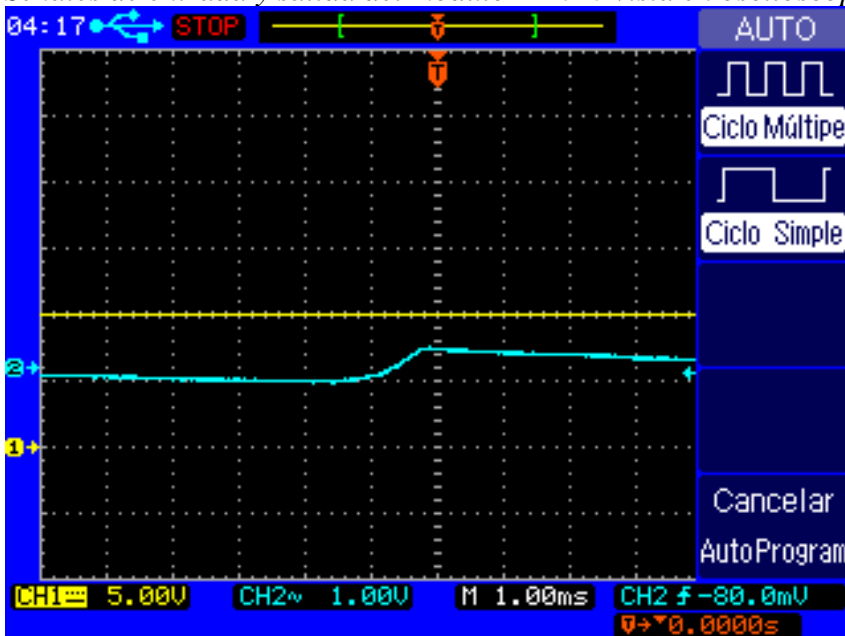
Resultado de voltaje del módulo AD620 mostrado en Tia Portal.



Además, mediante el osciloscopio se logró evaluar visualmente la calidad de la señal de salida, mostrada de color amarillo en la Figura 3.15, en comparación con la señal de entrada, mostrada de color azul en la Figura 3.15.

Figura 3.15.

Señales de entrada y salida del módulo AD620 vista en osciloscopio.



CONCLUSIONES

Luego de la investigación bibliográfica, se logró concluir que los sensores seleccionados previamente, están sobredimensionados, pues alcanzaban una fuerza de hasta 600 kN, cuando la MUE de la Universidad Técnica del Norte utiliza únicamente 30 kN para realizar los ensayos.

En la selección de sensores se plantearon soluciones de acuerdo con las necesidades de la MUE. Para la celda de carga se utilizó una capacidad de 30 kN y una alimentación de 12 V. Para el extensómetro se utilizó una velocidad entre 1 y 500 mm/min, además de una longitud aproximada de 50 mm. Por último, para el *encoder* se especificó que debe ser incremental, además de tener gran cantidad de pulsos por minuto, para una mejor resolución, y su velocidad mayor a la velocidad máxima del eje.

El costo de adquirir los sensores seleccionados es de \$5 901,16 y el costo de adaptación del sistema modular fue menor al de adquirir un DAQ, ya que, al tener un PLC con expansor de entradas analógicas, únicamente se realizó la amplificación y el filtrado de cada una de las señales.

La utilización de módulos puede generar un consumo elevado de energía, lo cual requiere una fuente de alimentación adicional. Con el fin de independizar el suministro de energía del PLC, se implementó una fuente de 5 V junto con un módulo CN6009 para filtrar la señal de manera adecuada, permitiendo su uso por otros componentes de manera óptima.

RECOMENDACIONES

Se sugiere verificar las conexiones de los cables y los pines de los módulos, de esta forma se asegura no quemar ningún módulo por mala conexión.

Se recomienda seguir cuidadosamente la documentación de los planos del sistema modular en caso de presentarse algún cambio o falla en los componentes. De igual forma, se espera el mismo uso de puertos para evitar el rediseño de las cajas y configuraciones utilizadas en el sistema modular para facilitar futuras modificaciones o actualizaciones.

El sistema DAQ puede ser adquirido con el objetivo de reducir espacios y tener menos preocupaciones de mantenimiento o recambio de partes.

La vida útil de las tapas no es tan larga como la de las cajas. Se recomienda ver la documentación de planos para adaptar su repuesto impreso.

El tablero tiene suficiente espacio disponible para agregar más módulos de sensores, en caso de que se necesite implementarlos.

Durante el proceso de acoplamiento y pruebas, se produjo la quema de varios módulos debido a la falta de consideración del voltaje de alimentación adecuado. Por lo tanto, es crucial llevar a cabo una revisión exhaustiva de las especificaciones de cada componente antes de utilizarlo, a fin de garantizar un uso correcto y evitar posibles daños. Esta revisión permitirá maniobrar con los elementos de manera óptima y segura.

REFERENCIAS

- [1] G. Silva González-Pacheco, “Máquina Universal Digital H011,” *Más Ciencia*, vol. 2, pp. 36–40, May 2013.
- [2] R. Lanchimba Salazar, “Diseño y construcción de la estructura de una máquina universal de ensayos destructivos - Sistema hidráulico de presión para la carrera de Ingeniería Mecatrónica,” Ibarra, 2018.
- [3] F. Valencia Coveña, “Máquina universal de ensayos destructivos: Instrumentación y control,” Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2018.
- [4] M. Diaz-Rodriguez, N. Scarcella, C. Marmolejo, and R. Chacon, “Diseño, construcción y puesta en servicio de una celda de carga con capacidad para 30 toneladas,” *Scientia Et Technica*, 2007.
- [5] Gunt Hamburg, “Equipment for Engineering Education,” *WP 300 Ensayo de materiales, 20kN*. <https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/materials-testing/tensile-compression-bending-and-hardness-testing/materials-testing-20kn/020.30000/wp300/glct-1:pa-148:ca-34:pr-1540>
- [6] CMS Metrology, “Máquina de 2 columnas para pruebas de tensión/compresión con microprocesadorCMSUTM-20DCC.” [Online]. Available: www.cmsmetrology.com.mxwww.controlymedicion.com.mx
- [7] F. Beer, R. Johnston, J. Dewolf, and D. Mazurek, *Mecánica de Materiales*, 5th ed. México D.F: McGrawHill, 2012.
- [8] D. J. Durango, E. J. Herrera, and N. E. Otero, “Diseño, construcción y validación del prototipo de una máquina para ensayos de resistencia de materiales,” *Ingeniería e Innovación*, Oct. 16, 2015.
- [9] J. M. Uribe Martínez, “Prototipo de una máquina de ensayo en compresión para el estudio mecánico de probetas por medio de interferometría holográfica digital,” Centro de Investigación en Óptica, A.C., León, 2017.

- [10] IBERTEST, “Ibertest Advanced Testing Solutions,” *Ensayo de compresión*. <https://www.ibertest.es/products/ensayo-de-compresion/>
- [11] Chenda Tester, “Máquina de pruebas Universal hidráulica con pantalla Digital WE-1000B, con dinamómetro de tensión,” *Alibaba.com*.
- [12] A. E. P. Transducers, “TS-Celula-tractiune-compresiuone-max-10To ,” Italy Via Bottego. Accessed: Jul. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.aep.it/es/producto/celulas-de-carga/ts/>
- [13] Y. An and R. Draughn, *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*, Primera. New York, 2000.
- [14] HBK Company, “HBK,” *Galga extensométrica de lámina*, 2019. <https://www.hbm.com/es/7836/galgas-extensometricas-de-lamina-tecnologia-y-tipos/>
- [15] Rigel Galvan, “Medidores de Presión Electromecánicos,” 2013. <http://instrumentaciondinamica2013.blogspot.com/2013/12/medidores-de-presion-electromecanicos.html>
- [16] P. X. Idrovo Urgiles and L. M. Quintanilla Molina, “Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, 2010.
- [17] HBK Company, “HBM,” *El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas*. <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>
- [18] Zwick/Roell, “Extensómetros clip-on con bandas extensométricas.” <https://www.zwickroell.com/es/accesorios/extensometros/extensometros-clip-on-con-bandas-extensometricas/#:~:text=Los%20extens%C3%B3metros%20clip-on%20con%20bandas%20extensom%C3%A9tricas%20son%20extens%C3%B3metros,excelente%2C%20por%20lo%20que%20proporcionan%20resultados%20muy%20fiables.>

- [19] IES Alfonso Romero Barcojo, “Encoders,” in *Unidad Didáctica: Control y robótica. Sección: Sensores*, Departamento de Tecnología, Ed.,
- [20] VIRTUALEXPO GROUP, “Direct Industry,” *¿Cómo elegir un encoder rotativo?* <https://guide.directindustry.com/es/que-encoder-rotativo-elegir/>
- [21] Servo Motors Adjust, “Servo Motors Adjust,” *Encoders*. <https://www.servomotorsadjust.com/encoders/>
- [22] Forn Valls S.A, “Forn Valls S.A Control y Automotismo Industrial,” *Interruptores Final de Carerera*. www.fornvalss.com
- [23] Jose Manuel Escacena Ventura, “Caracterización de las Propiedades Mecánicas del Aluminio 7075-T651.” <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4089/fichero/6.pdf>
- [24] INSTRON, “ASTM E8 Ensayo de tensión de materiales metálicos,” <https://www.instron.com/es-es/testing-solutions/astm-standards/the-definitive-guide-to-astm-e8-e8m>.
- [25] INSTRON, “La guía más completa sobre la norma ASTM A370,” *Instron* . <https://www.instron.com/es-es/testing-solutions/astm-standards/astm-a370-standard-for-testing-metal-elasticity-strength-elongation-reduction>
- [26] Zwick/ Roell, “ASTM D638, propiedades de tracción plástico,” <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/propiedades-de-traccion-astm-d638/#:~:text=El%20ensayo%20de%20tracci%C3%B3n%20seg%C3%BAn,y%20el%20coeficiente%20de%20Poisson>.
- [27] Instron, “AUTOMATIC CONTACTING EXTENSOMETER.” Barcelona, Spain, 2021. [Online]. Available: <https://www.instron.com/es-es/products/testing-accessories/extensometers/automatic>
- [28] R. Pallás Areny, *Sensores y acondicionadores de señal*, Cuarta., vol. 1. Marcombo, 2004.
- [29] José Luis Fernández Yagües, “Instrumentos de Medida,” *FisicaLab*. <https://www.fisicalab.com/apartado/medidas-precision>

- [30] Fundación Centro de Calidad y Metrología, “Informador Técnico 62 SENA CDT-ASTIN,” *Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología*, Santafé de Bogotá, Colombia, 2001.
- [31] L. Corona, G. Abarca, and J. Mares, *Sensores y actuadores. Aplicaciones con Arduino*, Editorial. México D.F, 2014.
- [32] J. Cruz, “Histéresis en mediciones,” 2011. [Online]. Available: <https://view.genial.ly/613abefef4797b0dc1279a4e/interactive-content-histeresis-en-mediciones>
- [33] José María Drake Moyano, “Tema III: El amplificador de instrumentación.,” in *INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES*, Santander, 2005.
- [34] Ignacio Moreno Velasco, “Filtrado,” Burgos. [Online]. Available: <http://kio4.com/elec/programas/6-Filtrado.pdf>
- [35] S. Beltrán, “Filtros Activos,” España, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/beltry1/filtros-electronicos-pdf>
- [36] H. Guzman and M. Duran, ““Módulos electrónicos y sistemas electrónicos modulares para monitorización y/o gestión o control de convertidores de potencia.,”” Universidad de Málaga, Málaga, 2014. [Online]. Available: <https://shre.ink/97ER>
- [37] Carles Riba i Romeva, *Diseño Concurrente*, UPC., vol. 1. Barcelona: POLITEXT, 2002. [Online]. Available: https://kupdf.net/download/diseo-concurrente-carles-riba_59a64952dc0d60f376568ee1_pdf
- [38] Megatronica, “Megatrónica,” *Fuente de Alimentación 5V 5A 25W*. <https://megatronica.cc/producto/fuente-de-alimentacion-5v-5a-25w/>
- [39] XLSEMI, “XL6009.”
- [40] Analog Devices, “AD620,” Norwood, 1999. Accessed: Jul. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620MIL.pdf>

