

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Patricia Yesenia Rodríguez Puitiza**

ASESOR: Mg. Willy Eduardo Carrera Soria

Lima, 03 septiembre del 2020

## RESUMEN

Debido a la alta demanda de controles de calidad de productos, los ensayos de materiales son realizados en varios ámbitos de la industrial para determinar el comportamiento de un material. Actualmente, las máquinas más modernas cuentan con tecnología incorporada que optimiza el desarrollo de los ensayos por medio de la adquisición de datos, lo que reduce los porcentajes de error de lectura gracias a la presencia de un sistema de monitoreo.

El presente trabajo de tesis se basa en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo para una Máquina Universal de Ensayos, propiedad de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Este propone optimizar el desarrollo de ensayo de materiales que los alumnos de la especialidad de Ingeniería Mecánica de la PUCP realizan actualmente. Entonces, el sistema de monitoreo desarrollado se encargará de monitorear los parámetros de fuerza y desplazamiento durante el desarrollo de un ensayo de materiales (compresión o tracción). Estos parámetros podrán ser visualizados en una interfaz gráfica de usuario en tiempo real; además, el sistema de monitoreo contará con un panel visualizador de las variables de fuerza y desplazamiento, y proveerá un control secundario de actuadores en la planta que brindarán seguridad a todo el sistema.

En el capítulo I, se explican conceptos generales sobre el sistema monitoreo para máquinas universales de ensayos; asimismo, se describen algunos equipos comerciales. En el capítulo II, se aborda el marco problemático actual y los objetivos del presente trabajo de tesis. En el capítulo III, se desarrolla el diseño e implementación de un sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayos: el hardware y software desarrollado. Finalmente, en el capítulo IV, se describen los ensayos realizados y se muestran los resultados del sistema implementado.

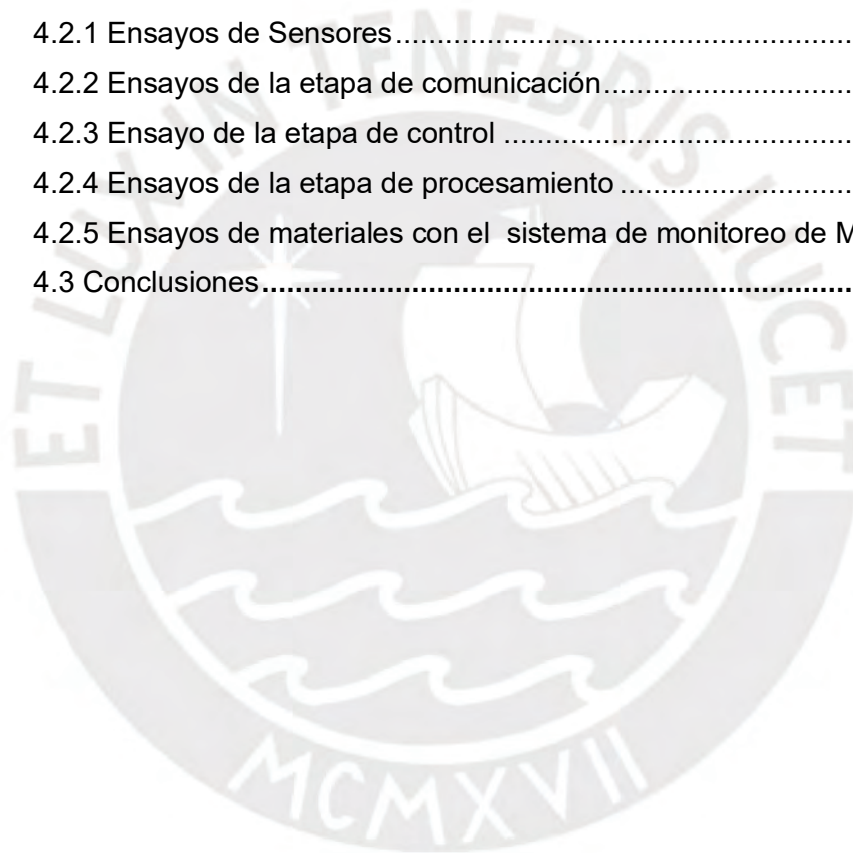
## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS .....</b>	<b>2</b>
1.1 Descripción.....	2
1.2 Sistema de monitoreo.....	2
1.2.1 Máquina Universal de Ensayos PUCP .....	4
1.2.2 Equipos existentes.....	5
1.3 Conceptualizaciones generales .....	8
1.4. Procesos de Medición en un sistema de monitoreo para una Máquina Universal de Ensayos.....	17
1.4.1 Fuerza .....	17
1.4.2 Desplazamiento.....	18
1.5 Interfaz de usuario.....	20
1.5.1 Pantalla digital LCD .....	20
1.5.2 Computadora Personal (PC).....	21
1.6 Síntesis.....	21
<b>CAPÍTULO II: PROBLEMÁTICA DE LA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DE LA PUCP .....</b>	<b>23</b>
2.1 Variables Internas.....	23
2.2 Marco Problemático.....	26
2.3 OBJETIVOS .....	27
2.3.1 Objetivo General.....	27
2.3.2 Objetivo Específicos .....	27
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS .....</b>	<b>28</b>
3.1 Alcance.....	28
3.1.1 Diagrama de Bloques .....	28
3.2 Planta .....	29
3.2.1 Máquina Universal de Ensayos.....	30
3.2.2 Bomba Hidráulica manual.....	31
3.2.3 Bloque de Conexiones Hidráulicas .....	31
3.3 Diseño Electrónico del sistema de Monitoreo .....	33
3.3.1 Sensores .....	33
3.3.2 Acondicionamiento de la señal .....	38

3.3.3 Circuito Visualizador .....	39
3.3.4 Actuadores .....	43
3.3.5 Excitador de Potencia .....	44
3.3.6 Controlador .....	50
3.3.7 Comunicación .....	51
3.3.8 Fuente de alimentación .....	52
3.3.9 Etapa de procesamiento e Interfaz de usuario .....	53

**CAPÍTULO IV: MONTAJE GENERAL Y PRUEBAS .....** **60**

4.1 Integración de la parte mecánica y electrónica .....	<b>60</b>
4.2 Ensayos del Sistema de Monitoreo.....	<b>61</b>
4.2.1 Ensayos de Sensores .....	61
4.2.2 Ensayos de la etapa de comunicación .....	73
4.2.3 Ensayo de la etapa de control .....	77
4.2.4 Ensayos de la etapa de procesamiento .....	80
4.2.5 Ensayos de materiales con el sistema de monitoreo de MUE .....	83
4.3 Conclusiones.....	<b>88</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>CAPÍTULO I: SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS</b> .....	<b>2</b>
Figura 1.2.1 Sistema de Adquisición de Datos [16].....	3
Figura 1.2.2 Partes básica de un convertidor analógico-digital (A/D) [10] .....	4
Figura 1.2.3 Partes de la Máquina Universal de Ensayos de la PUCP .....	4
Figura 1.2.4 Máquina Universal de Ensayos PROETI-E0011 (10 kN) [22]....	7
Figura 1.2.5 Máquina Universal de Ensayos Electromecánico PTE-LDW100 [23] .....	7
Figura 1.2.6 Máquina de Prueba de Fatiga Automatizada BAIROE-PL W 20 [24] .....	7
Figura 1.4.1 Especificaciones Técnicas de Célula de Carga Tipo “Donut” AEP C10 [25].....	17
Figura 1.4.2 Especificaciones Técnicas de Transmisor de presión MBS 3050 [29] .....	18
Figura 1.4.3 HD webcam Logitech c310 [34] .....	19
Figura.1.4.4 LVDT Spring loaded [27].....	20
Figura 1.5.1 Interfaz Gráfica de usuario TestLive [22] .....	21
<b>CAPÍTULO II: PROBLEMÁTICA DE LA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DE LA PUCP</b> .....	<b>23</b>
Figura 2.1.1 Desarrollo de un ensayo (compresión o tracción) en una máquina Universal de ensayos sin sistema de monitoreo.....	23
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS</b> .....	<b>28</b>
Figura 3.1.1 Diagrama de bloques del Sistema de Monitoreo.....	28
Figura 3.2.1 Máquina Universal de ensayo sin sistema de Monitoreo.....	30
Figura 3.2.2 Partes de la Máquina Universal de Ensayos de la PUCP .....	30
Figura 3.2.3 Bomba Hidráulica Manual.....	31
Figura 3.2.4 Modelo 3D Bloque de Conexiones Hidráulicas .....	32
Figura 3.3.1 Transmisor de Presión MBS 3500 -DANFOSS (0-600 bar) [30] .....	36
Figura 3.3.2 Transmisor de Presión MBS 3000 - DANFOSS (0-60 bar) [31]36	
Figura 3.3.3 Cámara Web Logitech C525 [35].....	37
Figura 3.3.4 Esquema de conexión: Lazo de corriente convencional [36]... 38	
Figura 3.3.5 Esquemático de 01 Circuito Visualizador .....	40
Figura 3.3.6 Esquemático de Circuito Visualizador.....	42
Figura 3.3.7 Válvula de Distribución 4/2 - HYTOS .....	44

Figura 3.3.8 Válvula Limitadora de presión - HYTOS .....	44
Figura 3.3.9 Circuito excitador 01 .....	44
Figura 3.3.10 Circuito excitador 02 .....	44
Figura 3.3.11 LED Forward Voltage vs. Forward Current (White Package) .....	45
Figura 3.3.12 Circuito esquemático: Control de válvulas .....	46
Figura 3.3.13 Output Characteristic (Id vs. Vds) .....	47
Figura 3.3.14 Esquemático Circuito de Control de válvulas .....	49
Figura 3.3.15 Tarjeta de desarrollo Arduino 2560 .....	51
Figura 3.3.16 USB 2.0 Cable type A/B.....	51
Figura 3.3.17 Fuente Switching 24 V DC a 5 A [46].....	53
Figura 3.3.18 Diagrama de Flujo del sistema de monitoreo para la Máquina Universal de ensayos de la PUCP .....	55
Figura 3.3.19 Diagrama de Flujo del Selección de ensayo .....	56
Figura 3.3.20 Diagrama de Flujo del Interfaz Gráfica de Usuario.....	57
Figura 3.3.21 Interfaz gráfica de usuario- Ventana Principal.....	59

#### **CAPÍTULO IV: MONTAJE GENERAL Y PRUEBAS .....**

Figura 4.1.1 Montaje Mecánico.....	60
Figura 4.2.1 Montaje de sensor de presión en el equipo patrón.....	62
Figura 4.2.2 Gráfica de %Error Relativo vs. Presión (PSI).....	64
Figura 4.2.3 Gráfica de %Error Relativo vs. Presión (PSI).....	66
Figura 4.2.4 Ubicación de componentes: Calibración de cámara .....	67
Figura 4.2.5 Muestra 'n': Cálculo factor pixel a mm .....	68
Figura 4.2.6 Montaje para calibración de cámara web Logitech C525 .....	70
Figura 4.2.7 Error Promedio en Pixeles .....	70
Figura 4.2.8 Evaluación de parámetros extrínsecos (Distancia focal) .....	71
Figura 4.2.9 Ubicación de componentes: Calibración de cámara (vernier) .	71
Figura 4.2.10 Gráfica de %Error Relativo vs. Distancia (mm) .....	73
Figura 4.2.11 Diagrama de Bloques: prueba Etapa de Comunicación .....	73
Figura 4.2.12 Circuito de Prueba- Comunicación Serial.....	74
Figura 4.2.13 Señales de voltaje de sensores de presión.....	74
Figura 4.2.14 Valores de Presión del Sistema: Lectura de señal de sensores de presión (0-60 bar) y (0-600 bar).....	75
Figura 4.2.15 Prueba de velocidad a 115200 baudios .....	76
Figura 4.2.16 Diagrama de Bloque: Control de Visualizadores .....	77
Figura 4.2.17 Tarjeta Electrónica de Visualización .....	77
Figura 4.2.18 Diagrama de Bloque: Control de Válvulas.....	78
Figura 4.2.19 Tarjeta de Control de Válvulas de distribución 4/2 vías.....	79

Figura 4.2.20 Diagrama de Bloque para el procesamiento de distancia .....	80
Figura 4.2.21 Diagrama de Bloque para el procesamiento de distancia .....	81
Figura 4.2.22 Pruebas sin Carga: Ensayo de Compresión .....	84
Figura 4.2.23 Pruebas sin Carga: Ensayo de Tracción.....	84
Figura 4.2.24 Pruebas con Carga: Ensayos de Compresión .....	86
Figura 4.2.25 Pruebas con Carga: Ensayos de Tracción .....	86
Figura 4.2.26 Pruebas con Carga: Ensayos de Compresión .....	87



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>CAPÍTULO I: SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS .....</b>	<b>2</b>
Tabla 1.2.1 Máquina Universal de Ensayos de la PUCP .....	5
Tabla 1.3.1 Conceptualizaciones generales de una Máquina Universal de Ensayos [10].....	8
Tabla 1.3.2: Conceptualizaciones generales de un sistema de Monitoreo ....	9
<b>CAPÍTULO II: PROBLEMÁTICA DE LA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DE LA PUCP .....</b>	<b>23</b>
Tabla 2.1.1 Causas y problemas presentados durante ensayos de materiales en la Máquina Universal de Ensayos sin sistema de monitoreo [24].....	24
Tabla 2.1.2 Causas y problemas presentados en la Máquina Universal de Ensayos con sistema de monitoreo .....	25
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS .....</b>	<b>28</b>
Tabla 3.2.1 Datos de la Máquina Universal de Ensayos .....	31
Tabla 3.3.1 Requerimientos sensor Presión .....	33
Tabla 3.3.2 Cuadro comparativo de Sensores para medir fuerza .....	34
Tabla 3.3.3 Cuadro comparativo de sensores de distancia.....	36
Tabla 3.3.4 Cuadro comparativo de componentes visualizadores .....	39
Tabla 3.3.5 Cuadro comparativo de válvulas de distribución 4/2 .....	43
Tabla 3.3.6 Cuadro comparativo de válvulas limitadoras de presión.....	43
Tabla 3.3.7 Alternativas de tarjetas de desarrollo .....	50
Tabla 3.3.8: Requerimientos de fuente de alimentación .....	52
Tabla 3.3.9: Alternativas de fuente de alimentación.....	52
Tabla 3.3.10: Alternativas de Software para sistema de monitoreo .....	54
<b>CAPÍTULO IV: MONTAJE GENERAL Y PRUEBAS .....</b>	<b>60</b>
Tabla 4.2.1: Selección de valores de PSI para calibración (0-60 bar).....	62
Tabla 4.2.2 Resultados Promedio-Calibración de Sensor de Presión (0- 60 bar).....	63
Tabla 4.2.3 Selección de valores de PSI para calibración (0-600 bar).....	65
Tabla 4.2.4 Resultados Promedio de Calibración-Sensor de Presión (0-600 bar).....	65
Tabla 4.2.5 Tabla de Conversión pixel a mm.....	68
Tabla 4.2.6 Error Relativo de Calibración de Sensor Distancia Eje Y .....	69



Tabla 4.2.7 Resultados Promedio de Calibración-Sensor Distancia (5-100 mm).....	72
Tabla 4.2.8 Resultados de Prueba de Tarjeta Electrónica de Control de Válvulas de Distribución 4/2 vías .....	79
Tabla 4.2.9 Tiempo Máximo de Procesamiento de Variables de Presión y Desplazamiento durante Ensayos sin Carga .....	82
Tabla 4.2.10 Tiempo Máximo de Procesamiento de Variables de Presión y Desplazamiento durante Ensayos con Carga .....	82
Tabla 4.2.11 Pruebas en Vacío: Ensayos de Compresión y Tracción .....	83
Tabla 4.2.12 Pruebas con Carga: Ensayos de Compresión y Tracción .....	85



## INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas de monitoreo son desarrollados para optimizar diferentes tipos de procesos debido al monitoreo de variables del sistema en tiempo real y la reducción del porcentaje de error de lectura. Existen varias aplicaciones de estos sistemas como: monitoreo de presión en neumáticos, monitoreo de condiciones ambientales, monitoreo de cámaras (sistema de seguridad), monitoreo de estructuras civiles, monitoreo de bioseñales, entre otros. En consecuencia, cada sistema de monitoreo está definido por funciones específicas para lo que fue diseñado.

Tal es el caso de los sistemas de monitoreo desarrollados para las máquinas universales de ensayos, que han optimizado la ejecución de los ensayos de materiales (compresión, tracción y flexión). El diseño de nuevos sistemas de monitoreo permite a los desarrolladores de este tipo de tecnologías determinar: los sensores más óptimos, el tipo de controlador, el tipo de comunicación (alámbrica o inalámbrica), y la interfaz de usuario según la necesidad del operador. Entonces, los sistemas de monitoreo para máquinas universales de ensayos están basados en un sistema de adquisición de datos conformados por un sistema de sensores de fuerza o presión, y desplazamiento, circuito DAQ, comunicación de datos e interfaz de usuario.

El objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un sistema de monitoreo para la Máquina Universal de Ensayos de la Pontificia Universidad Católica del Perú, que permita el monitoreo de las variables de presión y desplazamiento durante el desarrollo de ensayos de materiales destructivos (compresión y tracción).

## **CAPÍTULO I: SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS**

### **1.1 Descripción**

Actualmente, la máquina universal de ensayos o máquina de pruebas es el equipo por excelencia para la investigación y el desarrollo de ensayos de materiales en diferentes ámbitos de la industria, milicia, metalurgia, construcción naval, calidad y control, académico, entre otros [1].

En los últimos años, las máquinas más modernas cuentan con tecnología incorporada que optimiza el desarrollo de los ensayos y la adquisición de datos, reduciendo la probabilidad de error.

El “Laboratorio de Diseño de Mecánica Aplicada” de la Pontificia Universidad Católica del Perú cuenta con tres máquinas universales de ensayos para fines académicos. Estas se utilizan para realizar ensayos destructivos de materiales (compresión, flexión y tracción) que permiten al usuario analizar las características físicas y el comportamiento de diversos materiales. Sin embargo, estas máquinas aún no cuentan con un sistema de monitoreo incorporado, lo que dificulta el desarrollo de estos ensayos y la recolección de datos.

A continuación, se desarrolla las partes de un sistema de monitoreo, el proceso de adquisición de datos y algunas aplicaciones de sistemas de monitoreo en diferentes ámbitos de la industria. Seguidamente, se presenta a la máquina universal de ensayos de la PUCP, el objeto de estudio del sistema de monitoreo y las características más relevantes. Finalmente, se presenta los equipos disponibles en el mercado de máquinas universales de ensayos que cuentan sistema de monitoreo y las características más relevantes.

### **1.2 Sistema de monitoreo**

Actualmente, los sistemas de monitoreo son aplicados en los ámbitos de seguridad, análisis estructural, bioingeniería, energía, neumática, entre otros. La presencia de un sistema de monitoreo en un determinado proceso busca optimizar el desarrollo del mismo, ofreciendo una lectura en tiempo real de la variable que se quiere analizar por medio de un sistema de sensores eléctricos que interactúan con el medio físico, reduciendo la probabilidad de error de lectura de los instrumentos de medición. Además, si el sistema de monitoreo cuenta con un dispositivo de almacenamiento o memoria es posible generar bases de datos; lo que permite al usuario almacenar los

valores de lecturas de los sensores en todo instante y monitorear un proceso por medio del uso de gráficas [2].

Un sistema de monitoreo o sistema de adquisición de datos (DAQ) está basado en el proceso de adquisición de datos, y se encuentra conformado por sensores, hardware de medidas DAQ (circuito electrónico de acondicionamiento de señales y convertidor análogo digital A/D) y una computadora personal (PC) con software programable como se observa en la figura 1.2.1. Por tanto, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable [3].



**Figura 1.2.1 Sistema de Adquisición de Datos [3]**

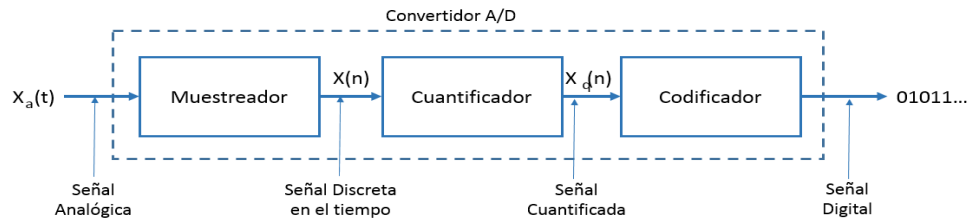
Del sistema de adquisición de datos se tiene que el conversor analógico digital, es el elemento más importante ya que es el agente que convierte la señal analógica en una señal digital. Conceptualmente, la conversión A/D es un proceso de tres pasos como se ilustra en la Figura 1.2.2.

**a) Muestreo:** conversión de la señal continua en el tiempo en una señal discreta  $x(n)$  en el tiempo, obtenida mediante la toma de “muestras” de la señal continua en instantes discretos de tiempos.

**b) Cuantificación:** conversión de los valores de cada muestra de la señal es representada por un valor seccionado dentro de un conjunto finito de posibles valores  $x_q(n)$ .

**c) Codificación:** proceso en el que cada valor discreto  $x(n)$  se representa mediante una secuencia binaria de b-bits.

En consecuencia, se ha modelado un convertidor analógico-digital (A/D) como muestreador seguido por un cuantificador y un codificador; no obstante, en la práctica un convertidor A/D se realiza mediante un único dispositivo que toma  $x_a(t)$  y produce un número de codificado en binario [4].

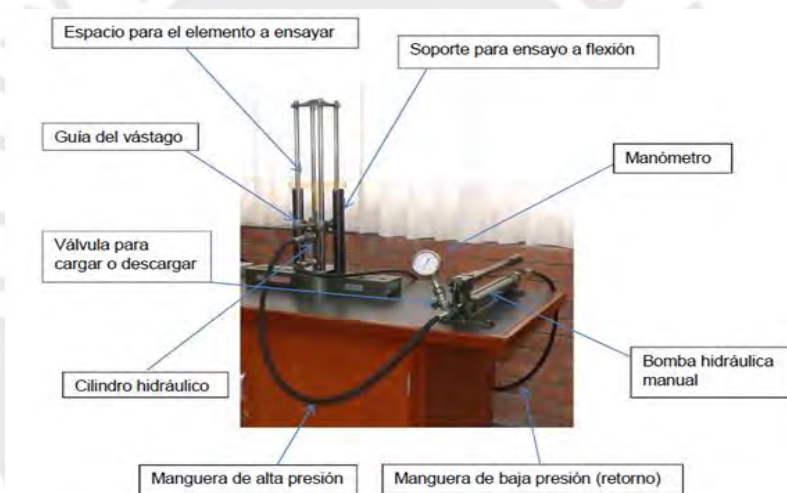


**Figura 1.2.2 Partes básica de un convertidor analógico-digital (A/D) [4]**

### 1.2.1 Máquina Universal de Ensayos PUCP

A continuación, se presentará a la máquina universal de ensayos de la PUCP, el objeto de estudio del sistema de monitoreo que se desea diseñar e implementar.

Este equipo es usado para el desarrollo de ensayos de materiales (compresión y tracción) por docentes y estudiantes de la universidad en el Laboratorio Mecánica Aplicada de la universidad. En la figura 1.2.3 se muestra la máquina universal de ensayos de la PUCP y sus partes.



**Figura 1.2.3 Partes de la Máquina Universal de Ensayos de la PUCP**

*Fuente: Laboratorio de Mecánica Aplicada*

Las variables de medición de los ensayos realizados son presión y desplazamiento, y los instrumentos de medición actuales son manómetro y vernier respectivamente. Además, el proceso de medición de variables se realiza manualmente; es decir, no cuenta con software para la recolección de datos, por lo que la lectura de sensores presenta errores de medición y ausencia de sincronismo durante el desarrollo de cualquiera de los ensayos. Para mayor detalle, revisar la tabla 1.2.1 que enumera las características de la Máquina Universal de Ensayos de la PUCP.

**Tabla 1.2.1 Máquina Universal de Ensayos de la PUCP**

<b>Características</b>			
<b>Marca/Modelo</b>	TECHNOVATE / --	<b>Procedencia</b>	USA
<b>Tipos de ensayo</b>	Tracción, compresión y flexión	<b>Material de Probetas</b>	Metal y polímero
<b>Carga Máxima (kN)</b>	8.5	<b>Espacio máximo efectivo (mm)</b>	76.20
<b>Sistema generación de fuerza</b>	Bomba Hidráulica manual	<b>Fuente de alimentación</b>	No
<b>Sistema de Monitoreo</b>			
<b>Sensores</b>	No	<b>Interfaz de usuario</b>	No

*Fuente: Elaboración Propia*

### 1.2.2 Equipos existentes

La demanda de Máquina Universal de Ensayos se concentra en el campo de la fabricación de automóviles, defensa militar, aeronáutica y astronáutica, científica y educativa, electrónica, fundición metalúrgica y otras aplicaciones como herramienta para estudio de los materiales. Cada año muchas más empresas incursionan en la industria de las máquinas de prueba universales, el mercado está muy disperso y ha ido creciendo; a continuación, se mencionará datos curiosos asociado al mercado en los últimos años [5].

En 2014, China entre enero y julio del 2014 produjo 77.000 unidades de máquinas de prueba, y espera lograr una producción anual que sea más de 90.000 unidades [6].

En 2015, los mercados de mayor participación en el 2015 fueron América del Norte con el 34,92%, China con el 33.18% y Europa con un 28% en la industria de máquinas de prueba universal y aumentará de manera estable.

En 2018, a nivel mundial el mercado de Máquina Universal de Ensayos se valoró en 350 millones de dólares en 2018 y se prevé que alcance los 450 millones de dólares en 2025 [5].

Entonces, se deduce que la producción de máquinas universales de ensayos ha aumentado en los últimos años y la optimización de estos también. En consecuencia, los precios varían dependiendo de las diferentes características que presente los equipos, como: número de ensayos que puede realizar (tracción, compresión, flexión, etc.), tamaño y material del equipo, capacidad de la carga máxima (kN), tipos de

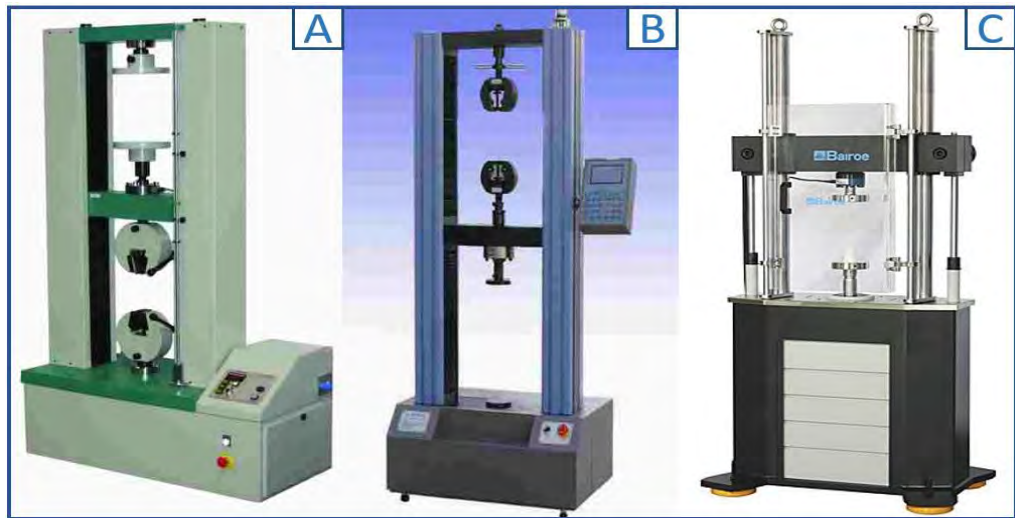
materiales que pueden ensayarse con el equipo. Además, la presencia de sistema monitoreo con sensores, circuitos electrónicos y una interfaz para el usuario, influye en el costo del equipo.

A continuación, se presentan algunas Máquinas Universales de Ensayos comercializadas a nivel mundial y se describe las características más relevantes:

Primero, la Máquina Universal de Ensayos Computarizada PROETI – Modelo E0011 de 10 kN (ver figura 1.2.4), posee un sistema de monitoreo digital adherido a la máquina, está conformado por un sistema de sensores, circuitos de adquisición de datos, computadora personal (PC) y la interfaz de usuario. La interfaz gráfica de usuario utiliza el software de ETIWI desarrollado por la misma empresa, provee al usuario monitoreo y análisis de variables de fuerza y desplazamiento en tiempo real durante la realización de ensayos y generación de registros con la data obtenida (revisar especificaciones técnicas ‘Tabla A15.1’ en el ANEXO 16).

En segundo lugar, la Máquina Universal de Ensayos Electromecánicos de 10 kN con Pantalla Digital modelo LDW-100 de PTE (ver figura 1.2.5), cuenta con un sistema de monitoreo digital adherido a la máquina, conformado por un sistema de sensores, circuitos de adquisición de datos, una pantalla digital LCD y la interfaz de usuario básica. La interfaz de usuario ha sido desarrollada por la misma empresa y es capaz de mostrar los resultados del monitoreo de las variables de fuerza y desplazamiento durante la realización de ensayos, por medio de la pantalla digital LCD (revisar especificaciones técnicas ‘Tabla A15.2’ en el ANEXO 16).

En tercer lugar, se presenta a la Máquina de Prueba de Fatiga BAIROE, modelo PLW20 (ver figura 1.2.6). Cuenta con un sistema de monitoreo digital adherido a la máquina y está conformada por el sistema de sensores, circuitos de adquisición de datos, PC y la interfaz gráfica de usuario proporcionan el monitoreo de variables de fuerza y desplazamiento durante la realización de los ensayos. El módulo depende de una PC para visualizar el registro de datos durante los ensayos y asegura una alta tasa de transferencia de los datos por medio de la comunicación alámbrica (cable serial conector tipo USB o cable de red conector RJ45). Además, la interfaz de usuario está gobernada por el software “TestLive”, desarrollado por la misma empresa que asegura la precisión de los resultados de la prueba y el monitoreo a tiempo real de las variables analizadas, (revisar especificaciones técnicas ‘Tabla A15.3’ en el ANEXO 15).



(A) Figura 1.2.4 Máquina Universal de Ensayos PROETI-E0011 (10 kN) [7]

(B) Figura 1.2.5 Máquina Universal de Ensayos Electromecánico PTE-LDW100 [8]

(C) Figura 1.2.6 Máquina de Prueba de Fatiga Automatizada BAIROE-PL W 20 [9]

En conclusión, las máquinas universales de ensayos presentadas anteriormente tienen como objetivo: ensayar diferentes tipos de materiales. Las máquinas más modernas cuentan con sistemas de monitoreo de señales, lo cual permite el monitoreo en tiempo real, y por medio de una interfaz de usuario se permite al usuario visualizar, registrar y analizar los datos adquiridos durante el ensayo para finalmente analizar el comportamiento de los diferentes materiales.

Sin embargo, se observa que los sistemas de monitoreo comerciales para máquinas universales de ensayo son diseñados según un equipo en particular, marca y modelo en específico. Es decir, el diseño e implementación de un sistema de monitoreo se debe desarrollar en función de la máquina universal de ensayos que se posee.



### 1.3 Conceptualizaciones generales

Se aprecia en la tabla 1.3.1 y en la tabla 1.3.2 conceptualizaciones que facilitarán el entendimiento de la presente tesis:

**Tabla 1.3.1 Conceptualizaciones generales de una Máquina Universal de Ensayos [10]**

MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS	Definición	Equipo mecánico que somete a estrés a un material por medio de ensayos de tracción o compresión, con la finalidad de analizar sus propiedades. Para generar tal fuerza, se usan servomotores o sistemas hidráulicos [11].		
	Ensayos destructivos	Su objeto es determinar las propiedades mecánicas del material analizado, definir características de resistencia, deformidad y comportamiento del material (fatiga, dureza, etc.) [12].		
	Probetas de Ensayos	Cuerpo cilíndrico de material metálico (aluminio) o plástico (polímeros), de sección transversal circular de 6 mm <sup>2</sup> , y su longitud varía de 120 mm hasta 290 mm según norma internacional ASM 370 [13].		
	Bomba Hidráulica	Equipo mecánico que suministra cierto caudal a un circuito hidráulico lo más constante posible. Es capaz de trabajar a altas presiones, pero no genera directamente dicha presión.		
	Tipos de ensayos	Compresión	Este ensayo consiste en aplicar fuerza a una probeta, en la dirección de su eje longitudinal que tiende a provocar un acortamiento de la misma. La carga será incrementada hasta la deformación, ruptura de la probeta o suspensión del ensayo [12].	
		Tracción	Este ensayo consiste en aplicar cargas nominales (fuerza) uniformemente repartidas en la probeta, de tal modo se produzca un alargamiento de la misma. La carga será incrementada hasta la deformación, ruptura de la probeta o suspensión del ensayo [12].	
	Variables del sistema	Fuerza	Magnitud vectorial que mide la intensidad del intercambio de momento lineal entre dos partículas, capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de los materiales.	
		Presión	Magnitud escalar que relaciona a la fuerza que actúa sobre la superficie, si la superficie plana de área A aplicando una fuerza normal F, se tiene: $P=F/A$ .	
		Deformación	Cambio de tamaño o forma de un cuerpo causado por fuerzas externas.	
		Desplazamiento	Cambio de posición de un cuerpo entre dos instantes o tiempos.	

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 1.3.2: Conceptualizaciones generales de un sistema de Monitoreo**

SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS	Definición	Tecnología que consiste en adquirir, acondicionar, analizar y visualizar los datos correspondientes a la lectura de señales de sensores durante una situación. Con un sistema de sensores se puede determinar las características comportamiento de un material (fatiga, dureza, etc.) [14].		
	Sensor	Definición	Dispositivo capaz de convertir una magnitud física en una señal que puede ser leída por algún instrumento o un observador. Los sensores electrónicos son pequeños y alimentados por baterías o alguna fuente de alimentación de baja tensión [15].	
	Acondicionamiento de señal	Definición	Alude al tratamiento una señal eléctrica de un sensor a otra capaz de ser analizada. Para ello se debe convertir, amplificar el nivel, linealizar la respuesta y filtrar la señal.	
	Controlador	Definición	Ente que gobierna la realización de funciones o acciones necesarias de acuerdo a una lógica de control pregrabada [16].	
		Convertidor análogo Digital (ADC)	Dispositivo capaz de proporcionar una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. Mediante un proceso de muestreo, retención, cuantificación y codificación [4].	
	Interfaz de usuario	Definición	Medio en el que el usuario entra en contacto físico y cognitivamente con la máquina. Es decir, sucede un intercambio de información entre el usuario y la computadora para un fin específico [17].	
Interfaz gráfica		Facilita la interacción entre la computadora personal (PC) y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos medidos. Una aplicación pre-construida con funcionalidad predefinida o un entorno de programación para construir aplicaciones con funcionalidad personalizada.		

*Fuente: Elaboración propia*

## 1.4. Procesos de Medición en un sistema de monitoreo para una Máquina Universal de Ensayos

### 1.4.1 Fuerza

La fuerza puede ser generada de dos maneras por medio de un sistema de generación de presión tipo hidráulico y sistema de generación de fuerza que hace uso de servomotores; estos dos sistemas generan dos fuerzas perpendiculares a las áreas del objeto. Para medir la variable de fuerza ejercida sobre la probeta de ensayo se debe evaluar el tipo de ensayo compresión o tracción, debido a que la dirección de los vectores de fuerza varía según el tipo de ensayo. Para un ensayo de tracción la dirección de los vectores de fuerzas va del centroide de la probeta hacia afuera; mientras que para un ensayo de compresión las direcciones de los vectores van de afuera hacia el centroide.

Según lo expuesto anteriormente, los sistemas de monitoreo para máquinas universales de ensayos usan sensores de fuerza o sensores de presión.

#### 1.4.1.1 Sensor de Fuerza

Los sensores de fuerza permiten medir directamente la carga ejercida en el elemento analizado. En el mercado existen diferentes tipos de sensores de fuerza, por ejemplo: dinamómetro de pinza, dinamómetro de mano, acelerador de fuerza, célula de carga tipo donut, entre otras, y su elección dependerá de su aplicación [18]. No obstante, los sensores más usados en los ensayos de materiales son las 'células de carga'.

En la figura 1.4.1 se muestra la Célula de Carga Tipo Donut C10 de AEP, transductor de fuerza robusto con agujero central de hasta 400 kN de rango. Es aplicado para ensayos de tracción y compresión por su gran precisión, fabricado en acero inoxidable y sellado por una protección IP67, está pensado para emplearse en aplicaciones industriales. Además, el sensor tiene incorporado electrónica que permite obtener así una señal amplificada 0-10 V o 4-20 mA.


Especificaciones Técnicas de Sensor de Fuerza	
Rango: 10 a 400 kN Linealidad: 0.05%. Salida: Extensométrica, sensibilidad 2m V/V. Formato: Tipo anillo o arandela	

**Figura 1.4.1 Especificaciones Técnicas de Célula de Carga Tipo “Donut” AEP C10 [19]**

### 1.4.1.2 Sensor de Presión

La variable de fuerza es directamente proporcional a la presión, solo si el área del cuerpo sometido es constante; por lo que el sensor de presión mide de manera indirecta la variable de fuerza para este caso. Existen diferentes tipos de sensores como: 'Sensor de Thin Films' (película delgada), 'Sensor Thick film' (película gruesa), 'Sensor Piezorresistivo', entre otros, el tipo de sensor dependerá de la aplicación y rangos de presión de la panta de trabajo [20].

Los transmisores de presión son utilizados para medir presión manométrica debido a que están diseñados para aceptar una señal de presión diferencial, convirtiéndola en una señal de salida analógica. En la figura 1.4.2, se presenta el transmisor de presión MBS 3050, este equipo es compacto para trabajos severos con amortiguador de pulsos integrado está diseñado para utilizarlo en aplicaciones hidráulicas donde aparecen fenómenos como la cavitación, golpes de ariete o picos de presión, ofreciendo una medida fiable de la presión e incluso bajo condiciones duras. Además, presenta excelente estabilidad frente a vibraciones, construcción robusta y alto grado de protección EMC/ EMI, lo que hace que este transmisor cumpla con los más rigurosos requerimientos industriales [20].

Especificaciones Técnicas de Sensor de Presión	
Sensor: Piezorresistivo	
Carcasa: cuerpo robusto de acero inoxidable	
Rango de operación: 0-1 bar hasta 0-600 bar	
Señal de alimentación: 10 - 30 V DC	
Señales de salida: 4-20 mA, 0-10 V (señal habitual en la instrumentación)	

**Figura 1.4.2 Especificaciones Técnicas de Transmisor de presión MBS 3050**

[20]

### 1.4.2 Desplazamiento

Para medir la variable de desplazamiento o deformación longitudinal de la probeta de ensayo, se debe evaluar la presencia de algún cambio en su longitud: cuántos mm se estira durante el ensayo de tracción o cuántos mm se comprime durante el ensayo de compresión.

Actualmente, en el mercado existen una gama de sensores de desplazamiento como extensómetros, sensores fotoeléctricos, captadores de recorrido o sensores de desplazamiento, cámaras web, transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT), entre otros.

#### 1.4.2.1 Cámara web

Las cámaras webcam, mini cámara de video inalámbrica o un sistema de cámaras pueden ser usadas como sensores de distancia o desplazamiento, ya que la medición por visión por computadora lo permite.

La visión por computadora se presenta como una propuesta alternativa de medición de desplazamiento de objetos en planos 2D y 3D, y con ayuda de softwares que permiten el procesamiento de imagen como Matlab, Python, Labview, entre otros; este procesamiento de una imagen o secuencia de imágenes trae consigo una cantidad muy grande de información geométrica que puede ser aprovechada.

Actualmente, se han desarrollado técnicas y métodos de descomposición de imágenes para su representación en el espacio del mundo real. Por ejemplo, Thomas Bucher describe un método para mapear una imagen a coordenadas del mundo real y obtener así, una aproximación de la altura de objetos, longitudes y cambios de posición en píxeles; basándose en un pequeño grupo de parámetros de fácil estimación a partir de características de los objetos o marcas en la escena, esto sin la necesidad de requerir alguno de los parámetros intrínsecos de la cámara que posee el Sensor Kinect XBOX 360° [21].

Entonces, la cámara web se presenta como alternativa de sensor de distancia, el mercado ofrece distintos tipos de cámaras que varían según la resolución de la imagen, tipo de lente, marca, tamaño, etc; por ejemplo, una cámara web comercial como la cámara Logitech c310 (ver figura 1.4.3).


Especificaciones Técnicas de Sensor Distancia	
Captura de vídeo y fotos (Detección de movimiento)	
Resolución: Hasta 5 megapíxeles	
Controles de panorámico, inclinación y zoom	
Certificación USB 2.0 de alta velocidad.	
Software: Cámara Web Logitech	


Figura 1.4.3 HD webcam Logitech c310 [22]

#### 1.4.2.2 Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)

LVDT es un sensor de posición lineal que puede medir movimientos pequeños como pocas milésimas de pulgadas hasta posiciones de  $\pm 20$  pulgadas ( $\pm 0.5$  m) según el modelo. El rango de operación del sensor 'LVDT Spring Loaded' es 0.100 pulgadas

( $\pm 2.5$  mm) hasta 4 pulgadas ( $\pm 100$  mm), y se caracteriza por su 'operación libre de fricción', 'rápida respuesta dinámica' y 'robustez ante el ambiente'.

La operación libre de fricción es útil en los ensayos de materiales adecuados para sistemas de aforo dimensional de alta resolución debido a que permite responder muy rápidamente a los cambios en la posición central. Además, es ambientalmente robusto debido a que es capaz de soportar exposición a vapores (humedad), líquidos inflamables o corrosivos, y cuenta con protección magnética interna de alta permeabilidad minimiza los efectos de los campos de CA externa.

Especificaciones Técnicas de Sensor Distancia	
Carcasa: Construcción robusta de acero inoxidable.	
Rango de operación. 2.5 mm a 100 mm.	
Señal de alimentación: 10-28 V, 12-26V.	
Señal de salida: 0-10 V CC o 4-20 mA.	
Error de linealidad: $\pm 0.10\%$ de la salida de rango completo.	

**Figura.1.4.4 LVDT Spring loaded [23]**

### 1.5 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario es el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, computadora o dispositivo, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo. En consecuencia, una interfaz de usuario desarrollada para sistemas de monitoreo para máquinas universales de ensayos permite al usuario visualizar los datos de las variables evaluadas tales como fuerza o presión, y desplazamiento o deformación longitudinal durante el desarrollo del ensayo.

Existen diferentes sistemas de monitoreo, unos más complejo que otros, esto depende de la aplicación y el análisis que se quiere lograr con los datos obtenidos. Según lo expuesto anteriormente, los sistemas de monitoreo para máquinas universales de ensayos usan pantalla digital LCD o una computadora personal, ambos con un software específico grabado en la memoria del controlador u ordenador.

#### 1.5.1 Pantalla digital LCD

Las pantallas LCD poseen una estructura compacta y la operación para el usuario es sencilla. Estas poseen un controlador que tiene la función procesar y mostrar por la

pantalla LCD, datos como: la carga de prueba, el desplazamiento, la velocidad de prueba, estado de la prueba, entre otros [9].

### 1.5.2 Computadora Personal (PC)

Se hace uso de la PC para procesar y almacenar datos; además, en aplicaciones más interesantes como generar gráficas mediante las cuales el usuario puede interpretar mejor los fenómenos presentados durante el desarrollo de ensayos de tracción y compresión.

Los sistemas de monitoreo para máquinas universales de ensayos antes mencionadas, cuentan con interfaces gráficas de usuarios basadas en los siguientes softwares:

#### a) Software ETIWIN en entorno Windows [8]

- Permite la adquisición de datos producidos durante el ensayo, y permite exportar datos como fichas de resultados, en archivos EXCEL.

#### b) Software inteligente TestLive [7]

- Asegura la precisión de los resultados de la prueba, y monitoreo en tiempo real, y la comunicación es alámbrica a través de cable USB o cable ethernet con conector RJ45. (ver Figura 1.5.1).



**Figura 1.5.1 Interfaz Gráfica de usuario TestLive [7]**

En ambos casos, la tasa de transferencia de los datos del software es alta en tiempo real; sin embargo, su comercialización es limitada, ya que las interfaces de usuario han sido desarrolladas sólo para usarse para equipos específicos de la empresa fabricante.

### 1.6 Síntesis

Los sistemas de monitoreo para Máquinas Universales de Ensayos buscan monitorear los parámetros de fuerza y desplazamiento, durante el desarrollo de

ensayo de materiales (compresión y tracción). Estos sistemas de monitoreo en particular ofrecen monitoreo en tiempo real de las variables en cuestión; además, estos sistemas permiten tener acceso a los datos adquiridos durante los ensayos, que permiten analizar el comportamiento de las diferentes variables del sistema.

Por otro lado, se observó que los sistemas de monitoreo comerciales para máquinas universales de ensayo están diseñados exclusivamente para un equipo, marca y modelo en específico, y el software desarrollado sólo puede ser usado en dichos equipos. Entonces, el diseño e implementación de un sistema de monitoreo debe ser desarrollado en función de la Máquina Universal de Ensayos que se posee.

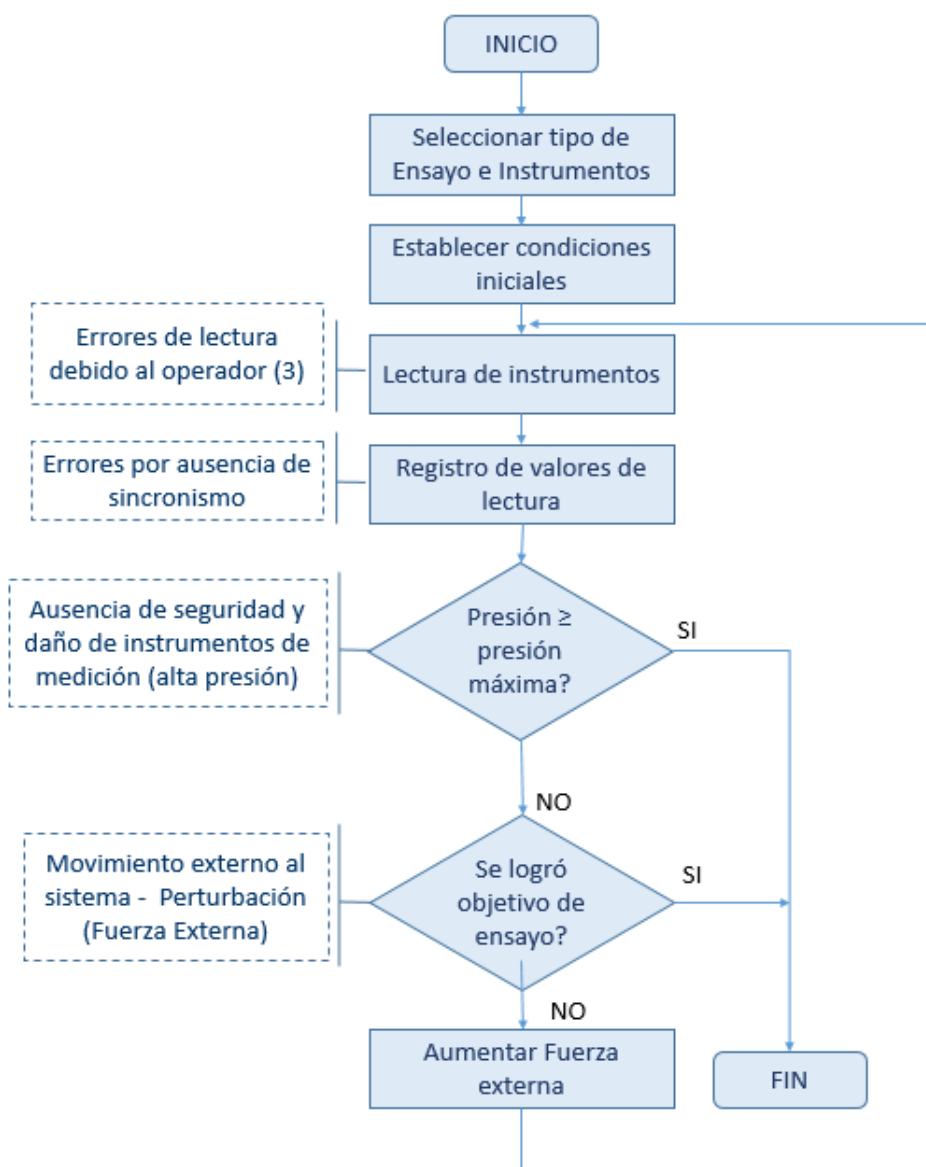
Por los motivos anteriormente expuestos, en el presente estudio se propone la implementación de un sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayos siguiendo el modelo básico de un sistema de adquisición de datos. Este sistema está conformado por sensores, hardware de medidas DAQ (circuito electrónico de acondicionamiento de señales y convertidor análogo digital A/D), y una computadora personal con un software programable, lo cual ofrece la posibilidad de generar una interfaz de usuario gráfica para ofrecer un mejor análisis de las variables monitoreadas durante el desarrollo de los ensayos [3].



## CAPÍTULO II: PROBLEMÁTICA DE LA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DE LA PUCP

### 2.1 Variables Internas

En la figura 2.1 se muestra el proceso convencional del desarrollo de un ensayo de materiales (contracción o tracción), sin utilizar un sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayos. En consecuencia, se puede identificar diversos factores afectan el registro de datos y análisis de las variables estudiadas.



**Figura 2.1.1 Desarrollo de un ensayo (compresión o tracción) en una máquina Universal de ensayos sin sistema de monitoreo**

*Fuente: Elaboración propia*

Durante el desarrollo de cualquier tipo de ensayo (compresión o tracción) en una máquina universal de ensayos sin sistema de monitoreo se presentan problemas. A continuación, en la tabla 2.1.1 se enumera los problemas presentados y las posibles causas de estos.

**Tabla 2.1.1 Causas y problemas presentados durante ensayos de materiales en la Máquina Universal de Ensayos sin sistema de monitoreo [24]**

Problema	Causas y Características
Error de medición debido al operador	Error por mal posicionamiento: Ocurre cuando el instrumento de medición (vernier) no se encuentra adecuadamente alineado con la probeta.
	Error de paralaje: Ocurre cuando la mirada del operador no está situada totalmente perpendicular al plano de escala.
	Errores que no admiten tratamiento matemático: Ocurre cuando el operador por cansancio hace una mala lectura.
No sincronismo en la lectura de valores de variables	Error generado por falta de sincronismo: Ocurre cuando los operadores encargados de observar los instrumentos de presión y desplazamiento, hacen la lectura de las variables analizadas en tiempos distintos.
Daño de instrumentos de medición (manómetros)	La fuerza externa ejercida por el operador genera una presión mayor a la que los manómetros puedan soportar. Durante el desarrollo del ensayo se presenten cambios bruscos presión lo que puede dañar la membrana del manómetro.
Ausencia de seguridad	El mal acoplamiento del manómetro podría generar derrame de aceite e incluso podría ocurrir accidente si se trabaja a altas presiones (mayores 350 bares).
Presencia de vibraciones	Cuando los valores de presión son muy cercanos al valor máximo de presión, la fuerza externa ejercida por el operario puede generar un movimiento involuntario de todo el sistema (perturbación), lo que afectaría la lectura de los sensores.

*Fuente: Elaboración propia*

Además, según un análisis previo del desarrollo del sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayos se ha evaluado que puede presentar diferentes perturbaciones, aspectos o situaciones que a veces no se toman en cuenta debido que se consideran despreciables o que no pueden suceder. Sin embargo, durante el

desarrollo de cualquiera de los ensayos se podrían presentar por lo que se exponen a continuación:

**Tabla 2.1.2 Causas y problemas presentados en la Máquina Universal de Ensayos con sistema de monitoreo**

Problemas	Causas y características
Equipos de costo elevado	Los posibles equipos como parte de la solución son: sensores de presión y desplazamiento, y válvulas hidráulicas, los cuales son costosos debido a la resolución requerida, al tipo de aplicación y por su procedencia.
Dificultad para diseñar el sistema mecánico de seguridad tipo hidráulico	Según el diseño de un sistema hidráulico convencional se necesita: sensores de presión, válvulas para retorno de aceite, cambio de ensayo y protección, y un bloque de conexiones hidráulicos que brinde soporte a estos elementos y brinde seguridad al trabajar a altas presiones.
Selección adecuada de la fuente de alimentación	Al tener sensores de presión y desplazamiento, un sistema mecánico de seguridad con tres válvulas, se debe evaluar la potencia que consumirá todo el sistema para seleccionar la fuente adecuada.
Lectura de señal con ruido externo	Al trabajar con niveles de voltaje en los sensores, se debe considerar utilizar filtros para prever ruidos [14].
Presencia de vibraciones	Durante el desarrollo de cualquiera de los ensayos, la fuerza externa sobre la palanca de la bomba manual; hace vibrar a toda la planta, lo cual podría presentarse como perturbaciones o ruido en la lectura de los sensores.
Lectura errónea de los sensores	Se presenta si los sensores no son previamente calibrados con un equipo patrón antes de un ensayo [15].
Toma de datos en tiempos exactos	El procesamiento de señales debe ser en tiempo real. Sin embargo, se puede presentar retrasos en la toma de datos de la señal de desplazamiento debido al procesamiento de imágenes previo, generando un retraso con respecto al muestreo de la otra señal [25].
Sistema de visualización en tiempo real	Este sistema que permita visualizar todos los parámetros analizados durante el desarrollo de un ensayo en tiempo real para conseguir un mejor análisis del comportamiento de material ensayado.

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Marco Problemático

Actualmente, el Laboratorio de Diseño Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, cuenta con tres máquinas universales de ensayos para pruebas de materiales. Estos equipos son antiguos y según el procedimiento actual de desarrollo de los ensayos de materiales (tracción, compresión y flexión) no es eficiente; en consecuencia, las mediciones de presión y desplazamiento no son exactas, por lo que presentan errores de medición. En consecuencia, se dificulta la tarea del alumno en comparar los ensayos prácticos con los procedimientos teórico-matemático que respaldan dicha experiencia.

A continuación, se describirá el proceso de desarrollo estos ensayos y los problemas que se presentan durante su desarrollo:

Primero, se define el tipo de ensayo (compresión o tracción), se cambia posición de mangueras según tipo de ensayo y se asegura que todo el aceite haya sido descargado del sistema. Luego, se monta la probeta a ensayar, se seleccionan e instalan los equipos de medición (manómetros y vernier), y se asignan una tarea en específico a cada alumno: medición de presión, medición de desplazamiento, anotación valores de variables en cuestión y aplicación de fuerza externa usando la bomba hidráulica manual.

Seguidamente, se establece una lectura inicial de las variables y la anotación de los primeros valores de presión y desplazamiento. Luego, se procede a aumentar la fuerza externa, leer y anotar los valores de las variables de interés, y este proceso se repite hasta finalizar el ensayo. Sin embargo, durante el desarrollo de los ensayos se presenta errores de medición debido al operador, por ejemplo: *“errores por mal posicionamiento”* cuando el instrumento de medición (vernier) no se encuentra adecuadamente alineado con la probeta, *“errores de paralaje”* cuando la mirada del operador no está situada totalmente perpendicular al plano de escala, y *“errores que no admiten tratamiento matemático”* que ocurre por la presencia de fatiga del operador, obteniendo hace una mala lectura.

Así mismo, se presentan “errores por ausencia de sincronismo” en la lectura de valores de variables, debido a que en un instante  $t_1$  el “alumno A” mide presión, en un instante  $t_2$  el “alumno B” mide desplazamiento, y en un instante  $t_3$  el “alumno C” anota los valores, lo cual implica una desfase de escasos segundos. También se presentan movimientos del sistema por la fuerza externa generados para altas presiones, lo cual afecta la lectura de instrumentos de operación. En consecuencia, durante la lectura de instrumentos de medición se presenta un considerable porcentaje de error relativo.

Por otro lado, se presenta una cuestión de cuidado como el daño a los manómetros que ocurre con mucha frecuencia; esto se debe a que la fuerza externa ejercida por el operador a veces mayor a la presión que los manómetros puedan soportar, o la presencia de cambios bruscos de presión que genera sobrepicos de presión.

Por último, se debe tener en cuenta la ausencia de seguridad que presenta el desarrollo del ensayo, ya que para algunos de los ensayos se genera una presión mayor a 350 bares, lo cual podría generar un posible accidente si no se ha acoplado correctamente el manómetro.

## **2.3 OBJETIVOS**

### **2.3.1 Objetivo General**

- Diseñar e implementar un sistema electrónico de monitoreo para una Máquina Universal de Ensayos, para el análisis del comportamiento y características de un material en específico.

### **2.3.2 Objetivo Específicos**

- Diseñar de hardware electrónico para el circuito del sistema de monitoreo.
- Desarrollar un software para el sistema de monitoreo y el sistema de control secundario.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario para visualizar el comportamiento de las variables de fuerza y desplazamiento.
- Implementar un sistema de seguridad mecánico para proteger los accesorios del sistema de medición de presión, e implementar un sistema electromecánico para el cambio de ensayo.
- Realizar pruebas respectivas.

## **CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS**

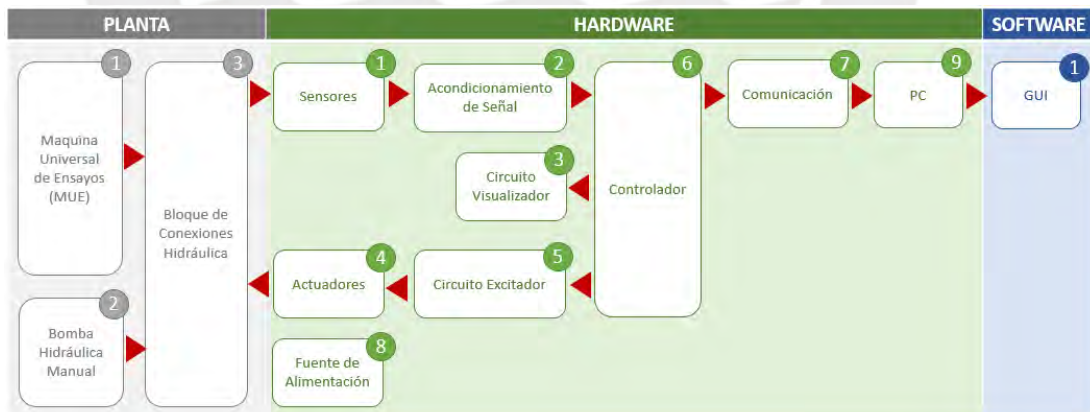
### **3.1 Alcance**

El Laboratorio de Diseño de Mecánica Aplicada de la Pontificia Universidad Católica del Perú, cuenta con tres máquinas universales de ensayos para el uso académico sin módulo electrónico de monitoreo. Esto hace que sus ensayos de materiales no sean aprovechados al 100% pues la toma de datos es manual con resultados que muestran tendencia más no exactitud ni precisión.

Con la presente tesis, se propone diseñar e implementar un sistema electrónico de monitoreo para una máquina universal de ensayos. Con la finalidad de proveer a los alumnos de Diseño Mecánico herramientas para mejorar el desarrollo de ensayos de compresión y tracción de materiales, y puedan realizar el análisis del comportamiento y características de un material en específico con mayor exactitud.

#### **3.1.1 Diagrama de Bloques**

A continuación, en la figura 3.1.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayos conformado por el hardware y software que interactúan con la planta permitiendo: controlar la planta y monitorear en tiempo real las variables de interés de la planta adquiridos por medio de una interfaz gráfica de usuario (GUI).



**Figura 3.1.1 Diagrama de bloques del Sistema de Monitoreo**

*Fuente: Elaboración propia*

En primer lugar, la planta está conformada por la máquina universal de ensayos, la bomba hidráulica manual y el bloque de conexiones hidráulica, cuya integración permiten: sujetar la probeta de metal que se somete a ensayos de materiales, generar

altas presiones en sistema usando una fuerza externa, y brindar soporte a los equipos de instrumentación electrónica (sensores y actuadores).

Luego, la etapa de hardware está conformada por sensores, circuitos de acondicionamiento de señal, visualizador y excitador, actuadores, controlador, medio de comunicación, fuente de alimentación o de energía y computadora personal (PC), cuyo rol que se detalla a continuación:

- Los sensores de presión y desplazamiento miden los parámetros de fuerza y desplazamiento respectivamente. Para medir el parámetro fuerza la resolución mínima requerida es 0.1 N y el rango de trabajo es de 0-10 kN; mientras para medir el parámetro de desplazamiento, se requiere una resolución mínima de 0.5mm y un rango de trabajo de 0-100 mm.
- Los circuitos electrónicos han sido diseñados según los requerimientos propuestos: el circuito de acondicionamiento de señal adecua la señal de los sensores para que pueda ser interpretada por el controlador, el circuito visualizador permite visualizar la variables de monitoreo del sistema, y el circuito excitador provee control de actuadores en la planta.
- El controlador centraliza las entradas y salidas del sistema de monitoreo y permite la lógica entre los equipos.
- La comunicación entre el controlador y la computadora personal (PC), se establece usando un cable serial.
- La fuente de alimentación provee energía al hardware del sistema de monitoreo.

Finalmente, la etapa software es la encargada del procesamiento y presentación de data por medio de una interfaz gráfica de usuario (GUI), que permite: el monitoreo en tiempo real, graficar la relación punto a punto de la Fuerza vs. Desplazamiento para el análisis de materiales, y permite al usuario interactuar con el sistema por medio de la computadora personal.

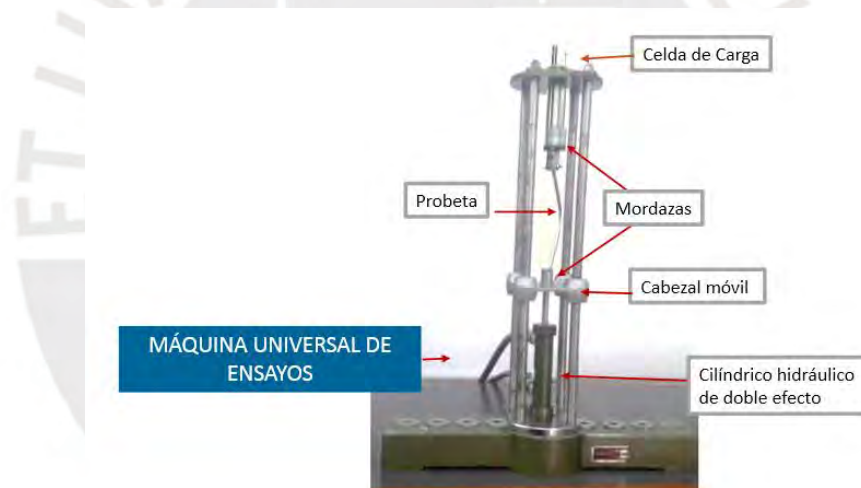
### **3.2 Planta**

La planta estudiada está comprendida por: una máquina universal de ensayos, una bomba hidráulica manual y un bloque de conexiones hidráulicas como se observa en la Figura 3.2.1.



**Figura 3.2.1 Máquina Universal de ensayo sin sistema de Monitoreo**  
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.1 Máquina Universal de Ensayos



**Figura 3.2.2 Partes de la Máquina Universal de Ensayos de la PUCP**  
*Fuente: Elaboración propia*

La universidad cuenta con tres ejemplares en el Laboratorio de Diseño Mecánico, los cuales permiten desarrollar los siguientes ensayos de materiales: compresión, tracción y flexión. En la figura 3.2.2 se señala las partes de este equipo: la celda de carga, las mordazas de sujeción, cabezal móvil y un cilindro de doble efecto.

A continuación, en la tabla 3.2.1 se presenta los datos técnicos con respecto al cilindro de doble efecto de la máquina universal de ensayos.

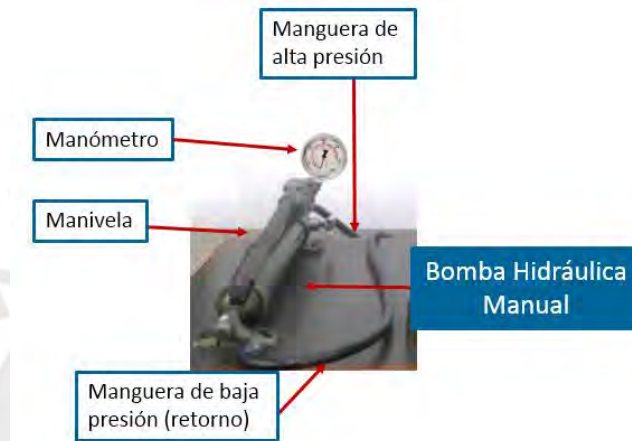


**Tabla 3.2.1 Datos de la Máquina Universal de Ensayos**

	mm <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
Área del Pistón para fuerza de compresión	240.00	0.372
Área del Pistón para fuerza de tracción	143.87	0.223
	mm	in
Carrera máxima del vástago	76.20	3

*Fuente: Guía de Laboratorio de Diseño Mecánico*

### 3.2.2 Bomba Hidráulica manual



**Figura 3.2.3 Bomba Hidráulica Manual**

*Fuente: Elaboración propia*

La bomba hidráulica manual se utiliza para incrementar la presión de un líquido incompresible en un circuito hidráulico. Esto es posible cuando un usuario sube y baja la manivela de la bomba por medio de una fuerza externa, lo que permite la entrada del fluido al sistema, generando un aumento de presión.

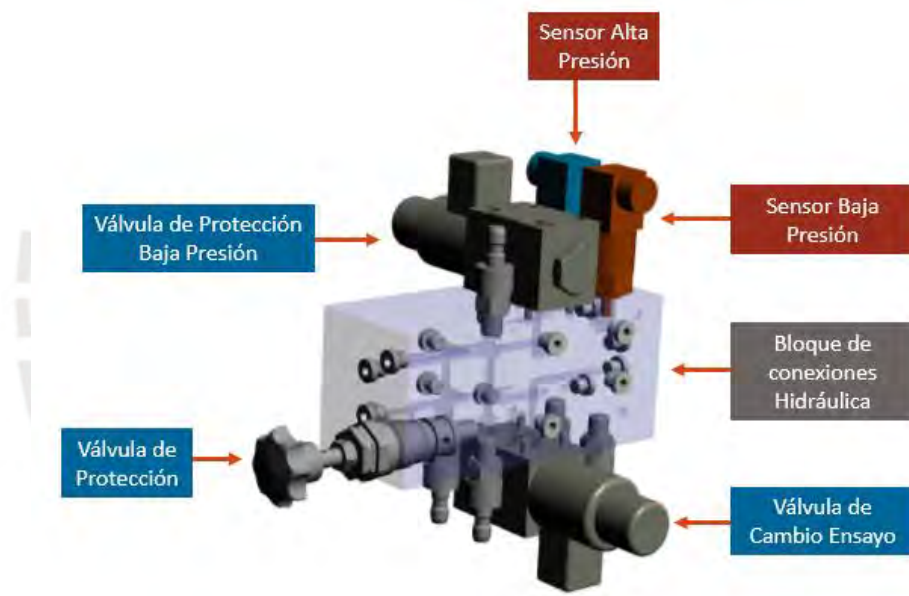
Cada máquina universal de ensayos, propiedad de Laboratorio de Diseño Mecánico, posee una bomba hidráulica manual que está conformada por: un manómetro, una manivela o palanca de accionamiento, y dos mangueras: la manguera de alta presión, y la manguera de baja presión para el retorno del aceite (ver figura 3.2.3).

### 3.2.3 Bloque de Conexiones Hidráulicas

Pieza mecánica de acero con agujeros que brinda soporte a los dispositivos hidráulicos como válvulas, sensores, manómetros, entre otros. Provee un sistema de conexiones entre los dispositivos del sistema por medio de los canales internos que se generan al perforar el bloque, según el diseño del circuito de conexiones hidráulicas en cuestión.

El diseño del bloque de conexiones hidráulica es propiedad intelectual de la Especialidad de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Para su desarrollo, se contó con colaboración de ingenieros Mecánicos Benjamín Barriga, Kurt Paulsen y Cesar Cosacca, quienes dirigieron el diseño del circuito oleo-hidráulico según los requerimientos y la proyección 3D, para mayor detalle revisar el ANEXO 11.

Así mismo, el diseño y manufactura del bloque de conexiones hidráulicas estuvo a cargo del Ingeniero Mecánico Renato Espinoza, Asistente de Laboratorio de Manufactura. A continuación, en la figura 3.2.4 se presenta el diseño 3D del bloque de conexiones hidráulicas final que muestra la ubicación y montaje de los dispositivos hidráulicos del sistema, para mayor detalle revisar el ANEXO 09 y ANEXO 10 donde se adjunta los planos respectivos.



**Figura 3.2.4 Modelo 3D Bloque de Conexiones Hidráulicas**

*Fuente: Laboratorio de Diseño*

### 3.3 Diseño Electrónico del sistema de Monitoreo

#### A. Hardware

##### 3.3.1 Sensores

##### 3.3.1.1 Sensor de Presión

##### Requerimientos

Se requiere medir la fuerza ejercida en una probeta de ensayo durante los ensayos de materiales o la presión del sistema que es directamente proporcional a la fuerza.

La medición de presión actual se realiza con un manómetro de los siguientes rangos: 0-10 bar, 0-300 bar y 0-600 bar, según rango máximo a trabajar; y la fuerza es calculada en función de la presión del sistema.

Entonces, se requiere cambiar el sistema anteriormente mencionado por un sistema electrónico que mida fuerza o presión, y se obtenga resoluciones menores a las actuales, como se observa en la Tabla 3.1.1.

**Tabla 3.3.1 Requerimientos sensor Presión**

Rangos de Presión	Manómetro	Rango de Presión (bar)	Resolución Actual	Resolución Requerida
Baja Presión		0-10 bar	0.2 bar	0.5 bar
Mediana Presión		0-350 bar	5.0 bar	5.0 bar
Alta Presión		0-600 bar	10.0 bar	10.0 bar

*Fuente: Elaboración Propia*

En consecuencia, se requiere uno o más sensores de fuerza o de presión para medir la variable de fuerza en una máquina universal de ensayos durante la ejecución de un ensayo de materiales.

Para lo cual se considera dos alternativas: un sensor de fuerza que opere en un rango de valores de 0 a 10 kN y posea una resolución mínima de 0.05 kN; o sensor de presión que opere en un rango de valores de 0 a 350 bar y posea una resolución mínima de 0.5 bar. En ambos casos, el equipo debe contar con un sistema de protección interna capaz de soportar cambios bruscos de presión o fuerza, debe ser resistente a ambientes hostiles y la medición de la señal de interés no debe ser afectada por presencia de perturbaciones.

### Alternativas

Los sistemas de monitoreo para máquinas universales de ensayos utilizan sensores de presión: transmisores o transductores de fuerza debido a su alta sensibilidad y arduas condiciones de trabajo.

La variable que se desea medir es fuerza, la medición puede realizarse directamente con un sensor de fuerza o indirectamente con un sensor de presión; en consecuencia, en la tabla 3.2.2 se presentan las alternativas de selección evaluadas.

**Tabla 3.3.2 Cuadro comparativo de Sensores para medir fuerza**

Dispositivo	Transmisor de Presión MBS 3500 DANFOSS (0-600 bar) [26]	Transmisor de Presión MBS 3000 DANFOSS (0-60 bar) [27]	Transmisor de Presión WIKA S10 (0-600 bar) [28]	Transductor de Fuerza HBM C2- 10 kN (50- 10 kN) [29]
Tecnología del sensor de	Piezorresistiva	Piezorresistiva	Piezorresistiva	Galga Extensiométrica
Voltaje de Alimentación	24 V DC	24 V DC	24 V DC	5 V DC
Señal de Salida	4-20 mA	4-20 mA	4-20mA	200-400 ohm
Precisión	± 0.5%Fs	± 0.5%Fs	± 0.5%span	± 0.2%span
Sensibilidad	3 bar 0.026 mA/bar	0.3 bar 0.26 mA/bar	2.5 bar 0.026 mA/bar	2 mV/N
Rango de Medición	0-600 bar	0-60 bar	0-600 bar	0-15 kN
Ubicación de Montaje	En bloque de conexiones hidráulicas (Montaje simple)	En bloque de conexiones hidráulicas (Montaje simple)	En bloque de conexiones hidráulicas (Montaje simple)	Entre la mordaza y cabeza móvil de la Máquina universal de ensayos (Montaje Complejo), ver figura 3.2.2
Costo	Activo Fijo del Laboratorio(\$330)	\$250	\$389.30	\$200
Disponibilidad	Inmediata	2 semanas	8 semanas	5 semanas
Tipo de Ensayo	Compresión y Tracción	Compresión y Tracción	Compresión y Tracción	Compresión

*Fuente: Elaboración Propia*

### **Criterios de selección**

Según la tabla 3.3.1 la resolución debe ser menor e igual a 0.5 bar y el rango de operación es de 0 a 600 bar y el montaje debe ser sencillo, es por ello que se ha realizado la siguiente evaluación:

El transductor de Fuerza C2-10 kN proporciona resultados precisos en presencia de fuerza dinámica y estáticas; no obstante, es complejo de montar en la planta y solo sería útil para el ensayo de compresión y no el de tracción. Por otro lado, los transductores WIKA S10 y Danfoss MBS 3500 cumplen con el rango de operación, pero no con la resolución, mientras que el sensor Danfoss MBS 3000 cumple con la resolución solicitada, pero no con el rango de operación del sistema.

Entonces, como se puede observar en ninguno de los casos se cumple al mismo tiempo los requerimientos: montaje sencillo, la resolución solicitada: 0.5 bar y el rango de trabajo de 0 a 600 bar.

En conclusión, se eligió montar un sistema medidor de presión con dos sensores de presión para cubrir rangos bajos y altos de presión. Para lo cual se escogió transmisores industriales marca DANFOSS de rangos de 0-60 bar y 0-600 bar respectivamente, con la finalidad de hacer conmutar la lectura de sensores de presión del sistema dependiendo la resolución requerida según el tipo de ensayo y la presión del circuito hidráulico. Además, según la hoja de datos estos sensores presentan: estabilidad ante vibraciones, una estructura robusta para el uso en entornos industriales e hidráulicos severos, y un alto nivel de protección EMC/EMI permiten a estos transmisores de presión cumplir los requisitos industriales más exigentes [30]. Además, se consideró que la señal eléctrica de transmisor sea señal de corriente para evitar pérdidas por efectos electromagnéticos.

En figura 3.3.1 y figura 3.3.2 se muestra los sensores elegidos según requerimientos, para más detalle se encuentra en la hoja de datos de MBS 3050 Danfoss, comprendida en el Anexo 05 y 06.



**Figura 3.3.1 Transmisor de Presión MBS 3500 –DANFOSS (0-600 bar) [26]**



**Figura 3.3.2 Transmisor de Presión MBS 3000 – DANFOSS (0-60 bar) [27]**

### **3.3.1.2 Sensor de Distancia Requerimientos**

Se requiere que un sensor de distancia o desplazamiento que mida valores de longitud de 0 a 100 mm, posea una resolución mínima de 0.5 mm y mínimo 2 muestras por segundo (2 Hz). Asimismo, la medición longitudinal del sistema debe ser inmune a las perturbaciones como vibraciones del sistema, e inmune a posibles interferencias electromagnéticas.

### **Alternativas**

Los sistemas de monitoreo de máquinas universales de ensayos utilizan principalmente los sensores fotoeléctricos, velocímetros, sensor de fibra de plástico, ultrasonidos, entre otros. Por este motivo, se plantean como alternativas de selección a los sensores de distancia que se presentan en la tabla 3.1.3.

**Tabla 3.3.3 Cuadro comparativo de sensores de distancia**

Dispositivo	HD Webcam C525 [31]	Sensor de ultrasonido HC sr04 [32]	Sensor de Desplazamiento Lineal HR 050 LVDT [33]
Vin	5 V DC	5 V DC	24 V DC
Rango	1280 x 720 pixel (416 x 234 mm)	30 – 3000 mm	2.5 -100 mm
Señal de Salida	Imagen (Señal de dos dimensiones en pixeles)	0-5 V (Señal eléctrica Analógica)	4-20 mA (Señal eléctrica Analógica)
Equipo que Procesa la señal	Computador Personal	Controlador	Controlador
Frecuencia	30 fps (30 fotogramas por segundo)	40 kHz (40000 muestras por segundo)	2.5 kHz (2500 muestras por segundo)
Resolución	0.325 mm/pixel	3 mm	0.5 mm ( $\pm 0.5\%F.S$ )
Costo	\$ 45	\$2.24	\$200
Disponibilidad	Inmediata	Inmediata	2 meses

*Fuente: Elaboración propia*

### **Criterios de selección**

Para seleccionar el sensor más adecuado se tuvo en cuenta los requisitos solicitados: rango de medición mayor igual 100 mm, resolución menor o igual a 0.5 mm y la frecuencia mayor a 2Hz (2 muestras por segundo).

Para todos los casos, cumple con el requisito del rango de medición mayor igual 100 mm, y la frecuencia mayor a 2 Hz (2 muestras por segundo) según se muestra en la tabla 3.3.3. No obstante, el requisito de resolución solo los cumple “el sensor de desplazamiento lineal LVDT HR50 y la cámara web C525, por lo que el sensor de ultrasonido HC-SR04 es desestimado por no cumplir con la resolución solicitada.

Entonces, el costo y el montaje son términos decisivos, en el caso del sensor lineal LVDT HR 50 es 4 veces más costoso que cámara y es complejo de montar en el sistema por lo cual se desestima su elección; mientras, la cámara web tiene un costo accesible y el montaje es sencillo por lo tanto, se escoge la cámara web C525. Además, que está comprendida por un sistema de 3 sensores fotoeléctricos, posee alta sensibilidad y asegura cumplir con la resolución mínima requerida.



**Figura 3.3.3 Cámara Web Logitech C525 [31]**

### 3.3.2 Acondicionamiento de la señal

#### Requerimientos

Convertir una señal de corriente de 4-20 mA a una señal de voltaje variable donde el voltaje máximo sea 5 V.

#### Criterios de selección

Según, los requerimientos solicitados se escogió utilizar una resistencia de 250 ohm con tolerancia 0.1% en serie a la salida del transmisor, para asegurar que la conversión de corriente a voltaje proporcione menor probabilidad de error. Entonces, como resultado se obtiene una señal de 1 a 5 V, y una lectura de 0 V si el circuito se encuentra abierto o se presenta ausencia de lectura del sensor.

#### Diseño

Se tiene que la señal de salida de sensor es:  $I \in [4;20]mA$ ; y el voltaje de salida máximo deber ser:  $V_{out\ max} = 5V$  .

$$R_{\max} = \frac{5V}{20mA} = 250\Omega$$

Si la resistencia se conecta en serie:

$$R_{\text{sensor}} = 250\Omega \rightarrow V_{out\ \text{min}} = 250\Omega * 4mA = 1V$$

Entonces, la señal de salida del sensor es:  $V_{out} \in [1;5]V$  , que a su vez corresponde a la señal de entrada al conversor análogo digital (ADC) del controlador.

#### Esquemático

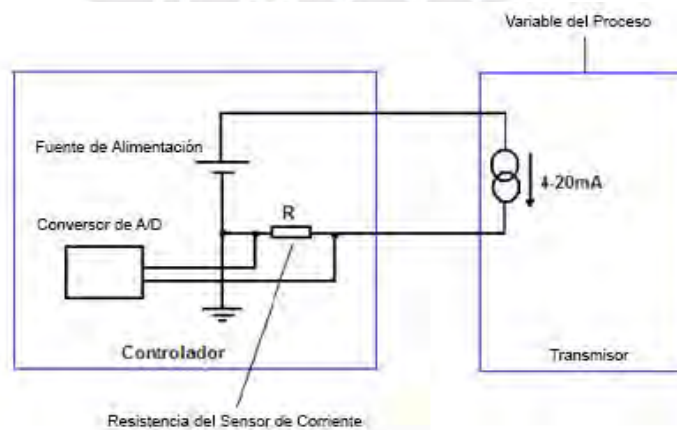


Figura 3.3.4 Esquema de conexión: Lazo de corriente convencional [34]



### 3.3.3 Circuito Visualizador

#### Requerimientos

Visualizar los valores de presión y desplazamiento, según las lecturas obtenidas del sistema durante el desarrollo de un ensayo de materiales.

La visualización de cada variable debe estar expresada en 4 dígitos, incluyendo un decimal de precisión. El circuito visualizador debe brindar facilidad de lectura, por lo que se debe tener en cuenta el tamaño del dígito y buen contraste de la luz emitida por cada led.

#### Alternativas

Para cumplir con los requerimientos, se analizaron las siguientes alternativas plasmadas en la Tabla 3.3.4.

**Tabla 3.3.4 Cuadro comparativo de componentes visualizadores**

Dispositivos	Display 7 Segmentos (1dígito) + Decodificador (74ls47)	Display 7 Segmentos (4 dígitos) + Decodificador (74ls47)	Módulo LED - 8X32 HT1632C	Pantalla LCD 2X16
Imagen de Alternativa				
Cantidad	8	2	2	2
Costo	\$7.28	\$2.26	\$15.38	\$5.88
Cantidad de Pines	(4X8) 32	(8x2) 16	(6X2) 12	(4X1) 4

*Fuente: Elaboración Propia*

#### Criterios de selección

En este caso, todas las alternativas expuestas cumplen con los requerimientos solicitados. Sin embargo, la alternativa que consta de dos display de 7 segmentos de 4 dígitos cada uno y dos decodificadores, son la alternativa más eficiente que usa menor cantidad de pines; además, cumple con el requerimiento de visualización legible, el contraste de la luz led, y la inversión no sobrepasa los 4.52 dólares en total.

## Diseño

### Circuito visualizador-control de displays de 7 segmentos

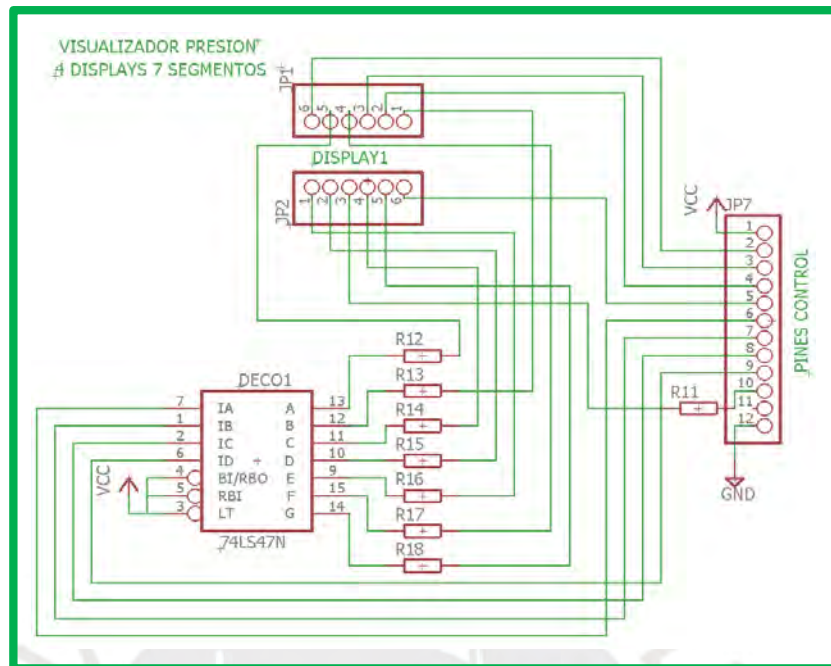


Figura 3.3.5 Esquemático de 01 Circuito Visualizador

Fuente: Elaboración propia

El circuito visualizador usa un pin “POWER” de 5 V de la tarjeta de desarrollo “Arduino 256” como fuente de alimentación  $V_{CC} = 5V$ ; además, 18 pines digitales son usados para controlar el circuito visualizador (del 24 al 41) y las señales de entrada:

$$V_{pin_x\_control} = 5V \text{ para "ON" y } V_{pin_x\_control} = 0V \text{ para "OFF"}.$$

Del circuito se tiene que:

$$R_{IN\_DECO} : \text{Resistencia a la entrada del decodificador } (\overline{abcd})$$

$$R_{IN\_DISPLAY} : \text{Resistencia a la entrada de display } (\overline{abcdefg})$$

#### a) Calcular la Resistencia de entrada al decodificador ( $R_{IN\_DECO}$ )

El decodificador 74LS47 al ser un dispositivo TTL, para activar o desactivar de un pin de entrada se requiere una señal digital:  $V_{IN\_H} = 5V$  y  $V_{IN\_L} = 0V$  respectivamente.

Entonces, las entradas IA, IB, IC e ID del decodificador tiene como señal de entrada:

$$V_{OUT\_H} = 5V \text{ y } V_{OUT\_L} = 0V \text{ (del Arduino 256) por lo que se considera a}$$

$$R_{IN\_DECO} = 0\Omega.$$

**b) Calcular la Resistencia de entrada al display ( $R_{IN\_DISPLAY}$ )**

Los siguientes datos son obtenidos por el fabricante (datasheet):

Datos de Datasheet de decodificador 74LS47 (Voltaje y corriente de Salida)

$$I_{OH\_MAX} = -50\mu A \quad V_{OH\_TYP} = 3.4V \quad V_{OH\_MIN} = 2.7V$$

$$I_{OL\_MAX} = 24mA \quad V_{OL\_MAX} = 0.5V$$

Datos de Datasheet de display (Voltaje y corriente de Salida)

$$I_{MAX} = 30mA \quad V_{F\_TYP} = 1.8V \quad V_{F\_MAX} = 2.3V$$

El circuito visualizador será conectado a la tarjeta de desarrollo Arduino, entonces:

$$V_{CC\_DECO} = 5V$$

$$\text{Además: } V_{pin\_control\_ON} = 5V \text{ y } V_{pin\_control\_OFF} = 0V$$

$$R_{IN\_DISPLAY} = \frac{[V_{OL\_DECO} - (V_{pin\_control} - V_F)]}{I_{OL}}$$

$$\text{Si: } V_{OL\_MAX} = 0.5V \rightarrow R_{IN\_DECO} = \frac{[0.5 - (5 - 1.8)]V}{24mA} = 112.5\Omega$$

$$\text{Si: } V_{OL} = 0V \rightarrow R_{IN\_DECO} = \frac{[0 - (5 - 1.8)]V}{24mA} = 133\Omega$$

El fabricante sugiere que:  $I_F = 10mA$  para  $15mcd$ , para:

$$R_{IN\_DISPLAY} = \frac{[0.5 - (5 - 1.8)]V}{10mA} = 270\Omega, \text{ o } R_{IN\_DISPLAY} = \frac{[0 - (5 - 1.8)]V}{10mA} = 320\Omega$$

Entonces:  $R_{IN\_DISPLAY} \in [112.5; 320]\Omega$ , y para la aplicación se considerado

$R_{IN\_DISPLAY} = 270\Omega$  para las resistencias de R11 hasta R26 (*revisar esquemático*).

**b) Circuito Visualizador de Indicadores**

Según fabricante se recomienda  $I_{LED} = 10mA$  y  $V_{LED} = 1.8V$

Aplicando ley de ohm se tiene:  $R_{in} = \frac{[5 - 1.8]V}{10mA} = 320\Omega \rightarrow R_{in} = 330\Omega$  para las

resistencias de R1 hasta R10 (*revisar esquemático*).

## Esquemáticos

A continuación, se presenta el esquemático del circuito visualizador (ver figura 3.3.6).

Para mayor detalle revisar el diseño PCB del circuito electrónico en el ANEXO 17.

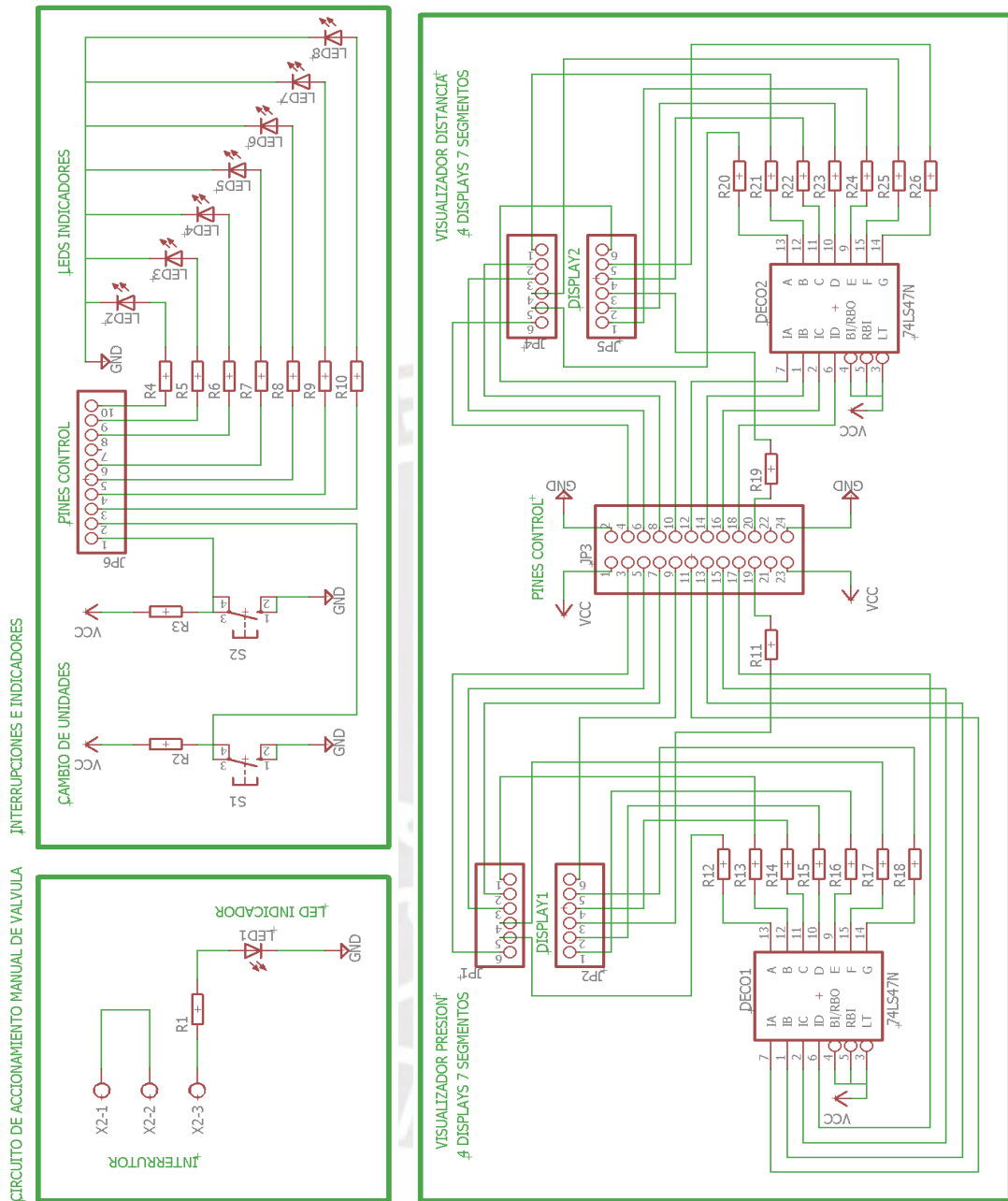


Figura 3.3.6 Esquemático de Circuito Visualizador

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.4 Actuadores Requerimientos

Dos válvulas de distribución 4/2 vías del tipo hidráulico de 0 a 350 bares, y deben ser robustas y aptas para trabajar en ambientes hostiles. La primera es utilizada para realizar el cambio de ensayo de compresión a tracción y la segunda como protección de la línea de baja presión del sistema hidráulico. Además, deben ser accionadas por una señal eléctrica de corriente o voltaje que activa al solenoide de la válvula.

Una válvula limitadora de presión de 350 bares, debe ser robustas y apta para trabajar en ambientes hostiles, debido a que tiene la función de proteger al sistema hidráulico de presiones mayores a 350 bares.

### Alternativas

En la tabla 3.3.5 se presenta las alternativas que se evaluaron para la elección de la válvula de distribución 4/2 vías; mientras, que en la tabla 3.3.6 se presentan las alternativas que se consideraron para la elección de la válvula limitadora de presión.

**Tabla 3.3.5 Cuadro comparativo de válvulas de distribución 4/2**

Dispositivo	Válvula de Distribución 4/2 HYTOS	Válvula de Distribución 4/2 HERION	Válvula de Distribución 4/2 ENERPAC
Voltaje de Alimentación	24 V DC	24 V DC	24 V DC
Rango de Medición	0-350 bar	0-320 bar	0-500 bar
Costo	\$ 249.32	\$420	\$540
Disponibilidad	1 mes	2 meses	2 meses

*Fuente: Elaboración Propia*

**Tabla 3.3.6 Cuadro comparativo de válvulas limitadoras de presión**

Dispositivo	Válvula limitadora de presión HYTOS	Válvula limitadora de presión LV 1-043 HYTOS
Ajuste Manual	Si (perilla de ajuste)	Si (ajuste interno)
Rango de Medición	0-320 bar	0-500 bar
Costo	\$328.15	\$418.00
Disponibilidad	1 mes	1 mes

*Fuente: Elaboración Propia*

### Criterios de selección

Para el caso de las válvulas de distribución 4/2, las tres propuestas presentadas cumplen con los requerimientos. No obstante, se descarta la propuesta de ENERPAC y HERION por su elevado costo, y se escoge la válvula de distribución 4/2 marca HYTOS (ver Figura 3.3.7 y Figura 3.3.8). Además, se ha considerado usar una bobina como actuador electromagnético para poder controlar cada una de las válvulas con una señal eléctrica estándar.

Para el caso de la válvula limitadora de presión, ambas alternativas presentadas cumplen con los requerimientos, por lo que se escogió la primera alternativa de la marca HYTOS por su menor costo.

Para mayor detalle técnico revisar la hoja de datos de válvula de distribución 4/2 vías en el **ANEXO 7** y la hoja de datos de la válvula limitadora de presión en el **ANEXO 8**.



Figura 3.3.7 Válvula de Distribución 4/2 - HYTOS



Figura 3.3.8 Válvula Limitadora de presión - HYTOS

### 3.3.5 Excitador de Potencia Requerimientos

Accionar una carga de 24 V, 1.29 A y 31 W. Además, esta carga debe ser controlada por una señal digital.

### Alternativas

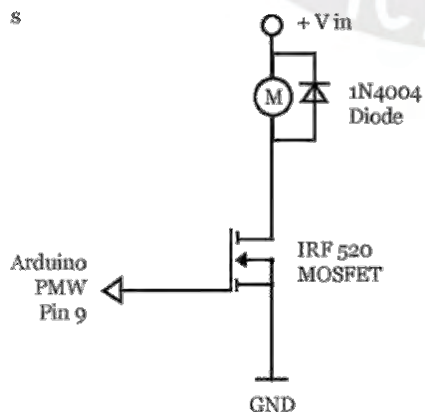


Figura 3.3.9 Circuito excitador 01

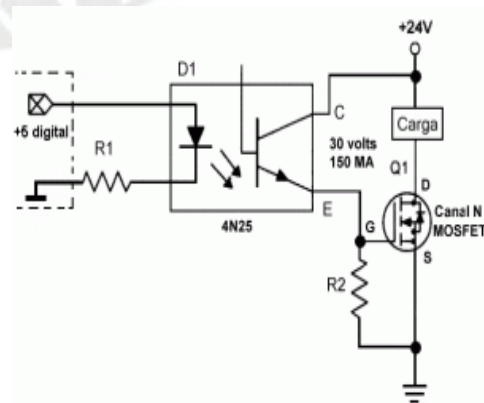


Figura 3.3.10 Circuito excitador 02

### Criterios de selección

La primera alternativa es descartada, debido a que la primera no considera el aislamiento entre la parte de potencia con la parte de control, implica que si se presenta algún mal funcionamiento en la carga puede dañar al controlador.

En consecuencia, se ha elegido la segunda alternativa, ya que se cumple con los requerimientos solicitados, además provee separación de la parte de control y la parte de potencia. Además, se ha considerado colocar un diodo de protección.

### Diseño

De la hoja de datos del optoacoplador 4N25, se sabe que:  $CTR = 20\%$

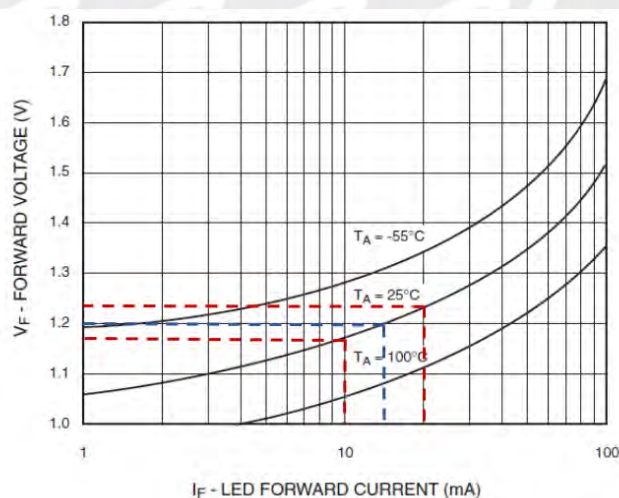
Donde CTR: relación de transferencia colector-emisor

$$CTR = \frac{I_c}{I_f} * 100\% \rightarrow I_c = 0.2 * I_f \text{ (A)}$$

Donde  $I_f$  : corriente del emisor y  $I_c$  : Corriente del detector

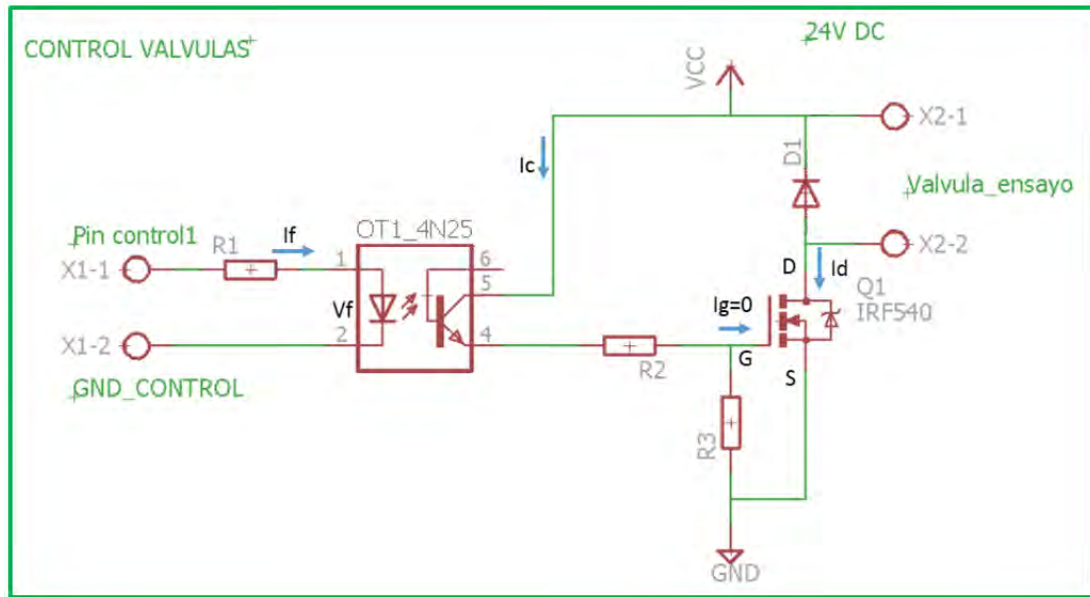
Según pruebas realizadas por el fabricante, para un 4N25 de empaque blanco:

Para una temperatura ambiente:  $T_a = 25^\circ C$



**Figura 3.3.11 LED Forward Voltage vs. Forward Current (White Package)**

*Fuente: Datasheet 4N25*



**Figura 3.3.12 Circuito esquemático: Control de válvulas**

Fuente: Elaboración propia

#### **Análisis en la zona de control:**

Según pruebas realizadas por el fabricante, para un 4N25 de empaque blanco (ver figura 3.3.11).

Para  $I_f = 10mA \rightarrow V_{f_{tipico}} = 1.18V$  y  $V_{f_{max}} = 1.5V$

Por Ley de OHM se plantea la siguiente ecuación:  $R_1 * I_f + V_f = 5V$

$$R_1 = \frac{(5 - 1.18)V}{10mA} = 382\Omega$$

$$R_{1_{min}} = \frac{(5 - 1.5)V}{10mA} = 350\Omega, \text{ entonces: } R_1 = 370\Omega$$

En consecuencia, se elige trabajar para:  $I_f = 10mA$  por sugerencia del fabricante,

$$\text{entonces: } CRT = \frac{I_C}{I_F} = 20\% \rightarrow I_C = 2mA$$

#### **Análisis en la zona potencia:**

Por Kirchhoff se cumple:

$$V_{CC} = (R_2 + R_3) * I_C \rightarrow 24V = (R_2 + R_3) * 2mA$$

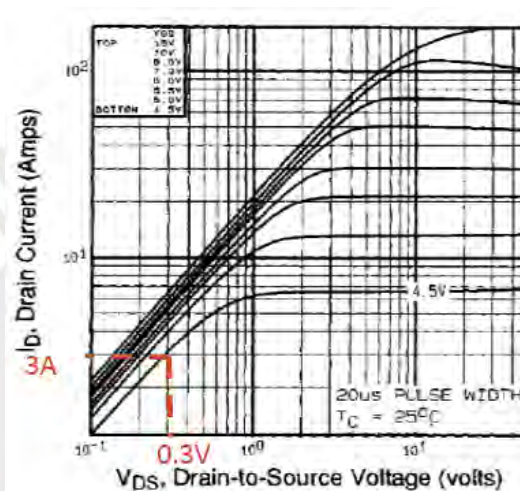
$$\text{Entonces: } (R_2 + R_3) = 12K\Omega$$



Además, se tiene que:  $V_{GS} = V_{cc} * \frac{R_3}{R_3 + R_2}$

Para un:  $V_{GS} = 4.5V$   $\left\{ \begin{array}{l} R_2 = 2.25K\Omega \text{ --- } R_2 \approx 2.2K\Omega \\ R_3 = 9.8K\Omega \text{ --- } R_3 \approx 10K\Omega \end{array} \right.$

Para calcular R2 y R3, se debe calcular  $V_{GS}$  cuando  $I_D = 1.29A$  donde:  $I_D$  es la corriente nominal de la carga (solenoides de la válvula).



**Fig 1.** Typical Output Characteristics,  $T_C=25^\circ C$

**Figura 3.3.13** Output Characteristic ( $I_d$  vs.  $V_{ds}$ )

Fuente: Datasheet IRF540 [60]

Para esta aplicación se requiere que el mosfet trabaje región de operación de corte y óhmica. Entonces según el Libro de Circuitos Micro electrónicos de SEDRA [35], se plantea que:

- a) Si:  $V_{in} = 0V$  entonces:  $I_f = 0A$ , por lo que fototransistor 4N25 está en corte, entonces:  $I_c = 0A$ , y se cumple que:  $V_{GS} = 0V$

Por lo tanto el mosfet está en la región CORTE, se cumple que:  $V_{GS} < V_T$ , donde:  $V_T = 2V$ , entonces  $I_D = 0A$ .

- b) Si:  $V_{in} = 5V$  y  $I_f = 10mA$ , por lo que fototransistor 4N25 está saturado

$$I_C = 2mA$$

Como  $I_{CARGA} = 1.29A$ , por cuestiones de diseño duplicará la  $I_D$  por seguridad, por lo tanto:  $I_D \approx 2.6A$ , por lo que según la hoja de datos el  $V_{GS}$  debe ser 4.5 V se hallar el punto de operación:  $Q_1(V_{DS}, I_D)$ .

$$I_D = K * [2 * (V_{GS} - V_T) * V_{DS} - V_{DS}^2]$$

La gráfica  $V_{DS}$  vs  $I_D$  (ver **Figura 3.3.13**), se tiene que para un mosfet IRF 540

Para un  $V_{GS} = 4.5V \rightarrow V_{GS} < V_T$ , donde  $V_T = 2V$

Y para  $V_{DS} = 0.3V \rightarrow I_{DS} = 3A$  se encuentra en la región OHMICA, por lo que se corresponde la siguiente "Ecuación de Transferencia":

$$I_D = K * [2 * (V_{GS} - V_T) * V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$3 = K * [2 * (4.5 - 2) * 0.3 - 0.3^2]$$

Se calcula que la constante es:  $K \approx 2.127$ , seguidamente se calcula el punto de operación:  $Q_1(V_{DS}, I_D)$  cuando  $I_D = 2.6A$ .

Ecuación de transferencia:  $2.6 = 2.127 * [2 * (4.5 - 2) * V_{DS} - V_{DS}^2]$

$$\text{Donde: } V_{DS} = \begin{cases} V_{DS1} = 0.257V \dots SI \\ V_{DS2} = 4.742V \dots NO \end{cases}$$

Si  $V_{DS} = 1.475V$ , cumple que:  $V_{DS} < V_{GS} - V_T \rightarrow V_{DS} < 2.5V$

Entonces, el punto de operación:  $Q_1(0.257V, 2.6A)$

No obstante, se debe analizar que el transistor no opere en la zona SATURACIÓN.

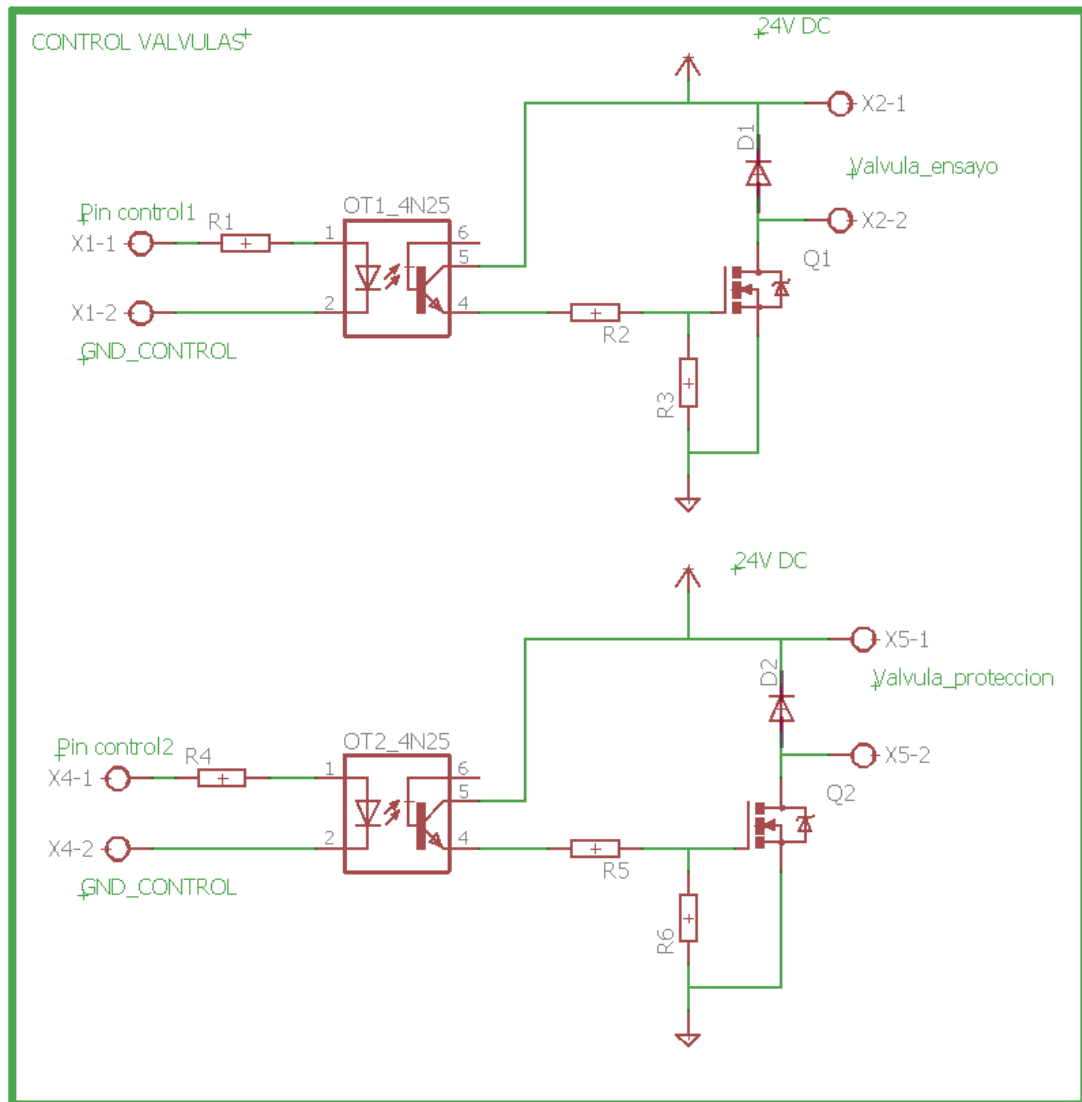
Por lo que  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$  debe ser FALSO

Si:  $V_{DS} = 0.257V \quad V_{DS} \geq 2.5V \dots (FALSO)$

Entonces se asegura que el mosfet trabaja solo en las regiones de CORTE y OHMICA.

### **Esquemáticos**

A continuación, se presenta el esquemático del circuito control (ver figura 3.3.14). Para mayor detalle revisar el diseño PCB del circuito electrónico en el ANEXO 18.



**Figura 3.3.14 Esquemático Circuito de Control de válvulas**

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3.6 Controlador Requerimientos

Un controlador que cuente con 30 pines digitales para que sean configurables como entrada o salida: 3 pines para interrupciones, 18 pines (visualizador), 2 pines (control) y 7 pines (led indicador). Además, se requiere dos puertos del conversor análogo digital (ADC) para la lectura de dos entradas analógicas (dos sensores de presión) y un puerto de comunicación serial RS232 para establecer la comunicación entre el controlador y la computadora personal. Por otro lado, se solicita 10 muestras por segundos, entonces por criterio de Nyquist se debe adquirir 20 muestras en 1 segundo; entonces, cualquier reloj cumple con ello.

### Alternativas

**Tabla 3.3.7 Alternativas de tarjetas de desarrollo**

Dispositivo	Tarjeta De Desarrollo Pic18fjs1 [36]	Tarjeta De Desarrollo Arduino 2560 [37]
Microcontrolador	PIC18F97J60	ATmega2560
Voltaje de operación	2-3.6 V	5 V
Numero de pines digitales I/O	100	54
Entradas analógicas	16 ch / ADC: 10 bits	16 / ADC: 10 bits
Corriente DC por pin	--	20 mA
Periféricos de comunicación digital	2-UART, 2-A/E/USART	4 UARTs para la comunicación por el Puerto USB
Timers	2 x 8-bit, 3 x 16-bit	Timer 0 y Timer2 (8 bits) Timer1, Timer3, Timer4, Timer 5 (16bits)
Memoria flash	128 KB	256 KB
SRAM	3.808 KB	8 KB
Costo	\$68.20	\$55.60

*Fuente: Elaboración propia*

### Criterio de Selección

Primero se consideró utilizar sólo un microcontrolador como ATmega2560 por su bajo costo \$ 7.3 e implementar una tarjeta según los requerimientos establecidos, lo que implicaría tiempo y dinero adicional. Entonces, se decidió adquirir una tarjeta de

desarrollo, debido a que su costo sería semejante a diseñar una propia y se ahorraría tiempo de implementación y pruebas adicionales. En consecuencia, se evaluó utilizar tarjetas de desarrollo como: PIC18FJS1 o Arduino 2560, las cuales cumplen con los requerimientos solicitados (ver Tabla 3.3.7). Sin embargo, la tarjeta de desarrollo ARDUINO 2560 es seleccionada por un tema de precio; además, la tesista posee mayor dominio programando en el software de ARDUINO IDE (ver figura 3.3.15).

### **3.3.7 Comunicación** **Requerimientos**

Proveer comunicación entre el controlador y la computadora personal (PC) por lo que se solicita utilizar un medio físico de preferencia. Debido a que el controlador y la PC están próximos a la planta de ensayos y no se presenta movimiento alguno del sistema de monitoreo.

#### Criterio de selección

Según, los requerimientos solicitados se ha seleccionado utilizar un cable para comunicación serial: USB cable tipo A/B o cable USB 2.0 estándar (ver figura 3.3.16). Este cable es usado para proveer conexión física entre una tarjeta de desarrollo como: ARDUINO 2560, ARDUINO UNO, PIC18F97J60, entre otras [38].

En consecuencia, este medio físico de comunicación utiliza el protocolo de comunicación RS232 para establecer transmisión y recepción de datos de lectura de los sensores adquiridos.



**Figura 3.3.15 Tarjeta de desarrollo**  
**Arduino 2560**

Fuente: ARDUINO [37]



**Figura 3.3.16 USB 2.0 Cable type**  
**A/B**

Fuente: ARDUINO [38]

### 3.3.8 Fuente de alimentación

#### Requerimientos

Para energizar el sistema de monitoreo propuesto se necesita una fuente que provea 24 V @ 4 A, como se muestra en la tabla 3.3.8

**Tabla 3.3.8: Requerimientos de fuente de alimentación**

	Voltaje	Corriente	Potencia
Solenoides Válvula de distribución 4/2	24 V	1.29 A	30.96 W
Circuito excitador (receptor)	24 V	0.005 A	0.120 W
Sub Total	24 V	1.295 A	31.08 W
Total (x2)	24 V	2.59 A	62.16 W

*Fuente: Elaboración propia*

Sin embargo, por criterios de diseño y seguridad, el valor de corriente es multiplicado por un factor de 1.25.

$$I_{fuente} = 1.25 * (2.59 A) = 3.23 A$$

Entonces, la fuente de interés es de 24 V @ 4 A

#### Alternativas

Por este motivo, se plantean como alternativas de selección a las siguientes fuentes de alimentación que se presentan en la tabla 3.3.9.

**Tabla 3.3.9: Alternativas de fuente de alimentación**

Dispositivo	Fuente Conmutada	Fuente Lineal
Entrada	220 V AC @ 50-60 Hz	220 V AC @50-60 Hz
Salida	24 V DC @ 5 A	24 V DC @ 4 A
Eficiencia y energía disipada	Son 95% eficientes, el calor generado son por características no ideales de componentes	Disipa el exceso de energía en forma de calor (no es eficiente)
Peso	493 g	233 g
Graduar Voltaje de salida	Si * Ajusta el voltaje de salida (15%)	No
Costo	\$17	\$11

*Fuente: Elaboración propia*

### **Criterio de Selección**

Según las alternativas antes expuestas se tiene una fuente lineal y una fuente conmutada o *switching*. Para esta aplicación se escogió una fuente conmutada 24 V @ 5 A, debido a que es más eficiente a una fuente lineal, presenta un mejor diseño, y menor disipación de energía.

Además, las fuentes lineales presentan ruidos electrónicos por presencia de ondulaciones en orden de los milivoltios, este voltaje puede causar problemas e interferencia en los circuitos, mientras que la fuente *switching* presenta ondulación sólo en salidas altas de frecuencia. Como la aplicación de interés no controlará salidas de alta frecuencia, entonces la fuente *switching* es la mejor elección (ver figura 3.3.17). Además, se consideró que la corriente de salida sea 5 A y no de 4 A, considerando futuras aplicaciones.



**Figura 3.3.17 Fuente Switching 24V DC a 5A [39]**

## **B. Software**

### **3.3.9 Etapa de procesamiento e Interfaz de usuario** **Requerimiento**

El software debe permitir el envío y recepción de datos por el puerto serial de la computadora, la visualización de gráficas en tiempo real de los parámetros adquiridos, y el almacenamiento de arreglos de variables. Adicionalmente, debe permitir la creación de una interfaz gráfica para la interacción con el usuario.

Por otro lado, se debe procesar la señal de los sensores, proveer un control secundario a la planta por medio del accionamiento de actuadores e indicadores, y proveer monitoreo de las variables analizadas por medio de visualizadores.

### **Alternativas**

En la tabla 3.3.10 se presenta las alternativas de software para el sistema de monitoreo que se evaluaron para la solución propuesta.

**Tabla 3.3.10: Alternativas de Software para sistema de monitoreo**

Software	Descripción	Precio
Matlab	Software matemático que emplea lenguaje de alto nivel y provee un entorno interactivo que permite: uso de funciones matemáticas, cálculo numérico, desarrollo de algoritmos, adquisición, análisis, procesamiento de imágenes y visualización de datos (tablas, gráficas 2D y 3D), entre muchas otras funcionalidades. Además, cuenta con un entorno gráfico para diseño de interfaz de usuario (GUIDE) [40].	La Pontificia Universidad Católica del Perú posee licencia Precio: \$0
Labview	Software de desarrollo de sistemas de <i>National Instruments</i> , con una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería, y es ideal para reducir tiempos de pruebas. Además, permite visualizar los datos adquiridos es un requerimiento fundamental para cualquier sistema de pruebas, medidas o control, y permite desarrollar interfaces de usuario rápidamente para visualización de datos y entrada de comandos del operador [41].	La Pontificia Universidad Católica del Perú posee licencia Precio: \$0
Arduino IDE	Software de código abierto Arduino Software (IDE), el cual se ejecuta en Windows, y el entorno está escrito en Java y basado en procesamiento. Este software puede utilizarse con cualquier tarjeta Arduino, como el Arduino Mega 2560 [42].	Software libre Precio: \$0

*Fuente: Elaboración propia*

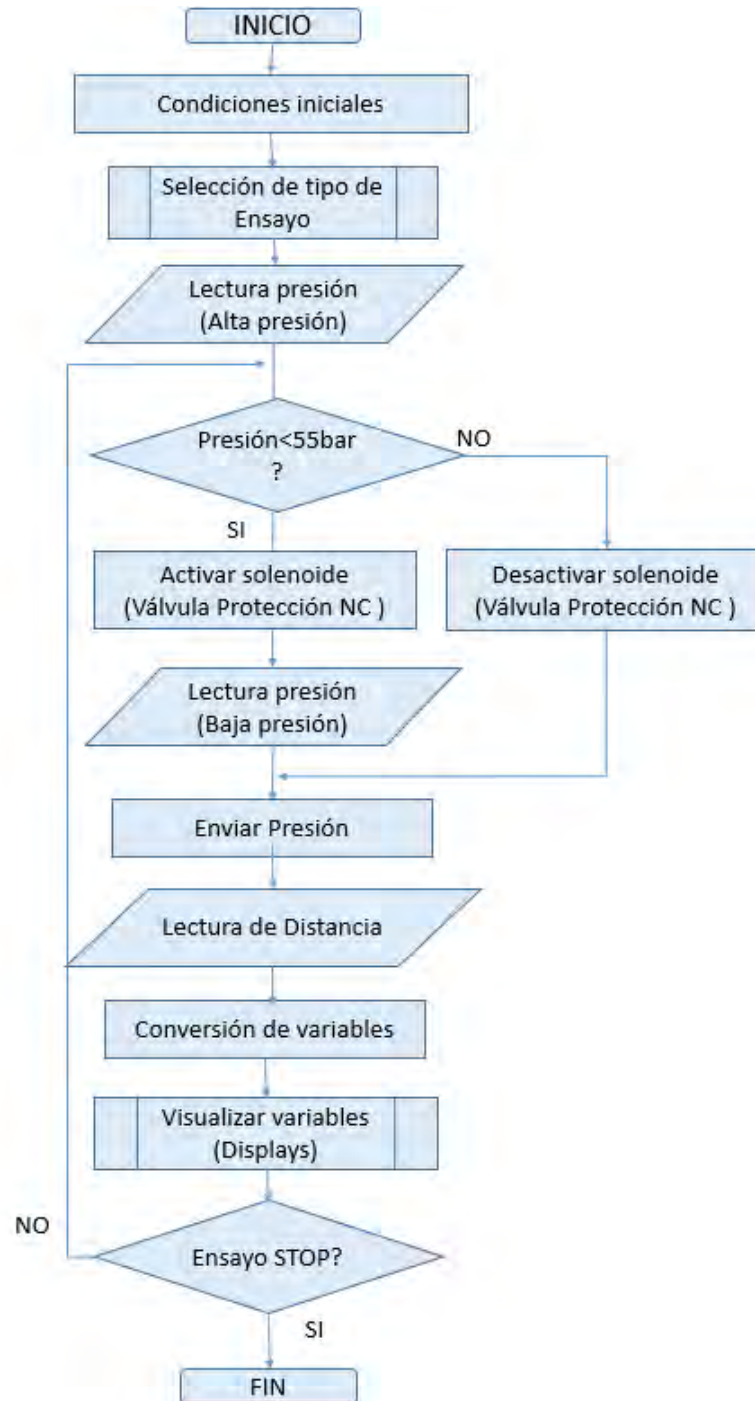
### **Criterio de Selección**

En los dos primeros casos, ambos son compatible con Arduino, y cumple con los requerimientos. En consecuencia, por conocimiento previo se prefirió utilizar Matlab y Arduino para desarrollo de la interfaz gráfica de usuario y la implementación del control respectivamente. Entonces, para la implementación del sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayos, se ha propuesto desarrollar dos programas por separado. En primer lugar, el software de control se ha desarrollado en Arduino Software (IDE) para poder configurar y establecer el control de entradas y salidas por medio de Arduino Mega 256. En segundo lugar, se ha propuesto desarrollar la interfaz gráfica de usuario en el software matemático Matlab.



### 3.3.9.1 Diagrama de Flujo –CONTROL

En la figura 3.3.18 se muestra el diagrama de flujo utilizado para la implementación del software de control para actuadores e indicadores de visualización del sistema según los requerimientos anteriormente expuestos; y por medio de un cable serial USB 2.0 tipo A/B se establece la comunicación entre el controlador y la computadora personal (PC).



**Figura 3.3.18 Diagrama de Flujo del sistema de monitoreo para la Máquina Universal de ensayos de la PUCP**

*Fuente: Elaboración propia*

El proceso inicia cuando se establece las condiciones iniciales y se selecciona el tipo de ensayo por medio de la interfaz gráfica, este dato es leído por el controlador si el ensayo es compresión desactiva el solenoide de la válvula y si es ensayo de tracción activa el solenoide de la válvula, como se observa en la figura 3.3.19



**Figura 3.3.19 Diagrama de Flujo del Selección de ensayo**

*Fuente: Elaboración Propia*

Luego se lee la señal analógica correspondiente al sensor de alta presión (0-600 bar) por seguridad: Si la presión del sistema es menor a 55 bar, entonces se activa el solenoide de la válvula de protección que permite al aceite fluir por la línea de baja presión y se vuelve a realizar la lectura de presión del sistema usando el sensor de baja presión (0-60 bar). Caso contrario, si la presión es mayor a 55 bar, se desactiva el solenoide de válvula de protección para proteger la línea de baja presión, y se considera la lectura sensor de alta presión (0-600 bar).

Luego se envía el valor de presión ya escalado al ordenador o la computadora personal; posteriormente se realiza la lectura de la variable distancia, que es procesada en la interfaz gráfica de la PC. Teniendo los valores de las variables de presión (mV) y distancia (pixel), se convierten a valores numéricos presión (bar) y distancia (mm) respectivamente. Estos valores son usados por las funciones: "Visualizador\_4Displays" y "Display" que calcula el valor de los 4 dígitos (milésima, centésima, decena y unidad) y lo muestra en los displays de 7 segmentos de cada variable (para mayor detalle revisar el diagrama de flujo en el ANEXO 19. Este proceso se realiza constantemente ya que se envía al decodificador un dígito del número por vez; no obstante, como este proceso es muy rápido es imperceptible al ojo humano. Finalmente, se analiza si el ensayo se ha culminado, casi contrario, se vuelve a repetir este procedimiento.

### 3.3.9.2 Diagrama de Flujo –Interfaz gráfica de usuario

En la figura 3.3.24, se muestra el diagrama de flujo utilizado para la implementación del software interfaz gráfica para el sistema de monitoreo de la máquina universal de ensayos de la PUCP.

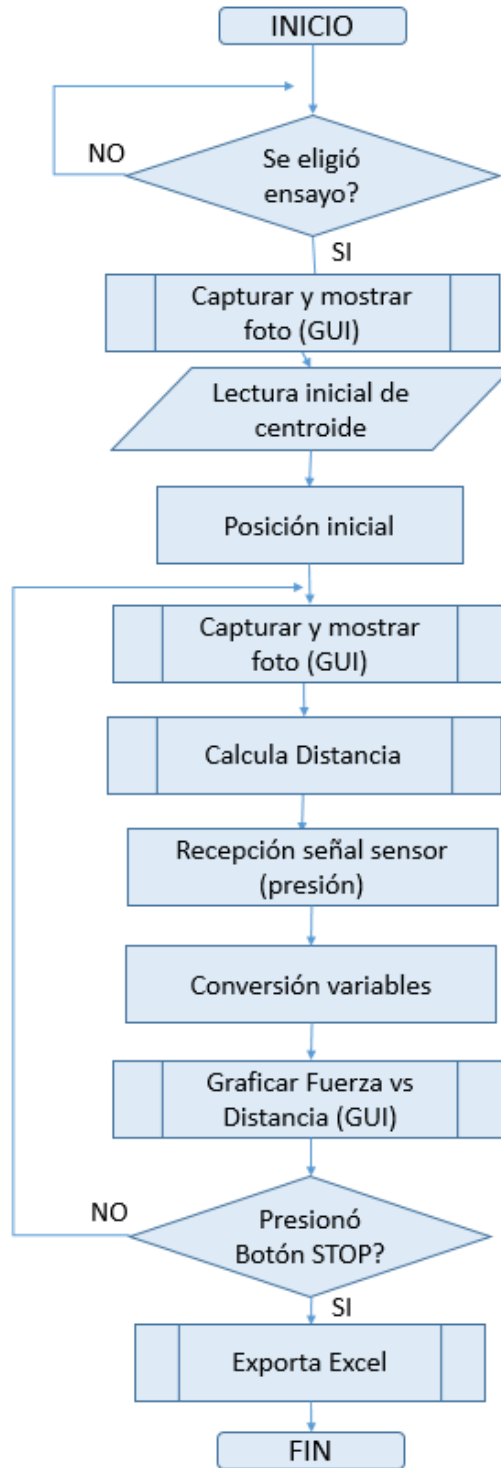


Figura 3.3.20 Diagrama de Flujo del Interfaz Gráfica de Usuario

Fuente: Elaboración Propia

Primero, se debe seleccionar el tipo de ensayo (Compresión o Tracción) e iniciar el ensayo. Luego, el software desarrollado captura y muestra fotos sucesivas del área que se monitorea en la interfaz gráfica de usuario, se calcula y registra la posición del “Centroide” del área de interés en movimiento (área de la cinta roja), y por variación de la posición de centroide se calcula la distancia en pixeles y se convierte a milímetros. Esta distancia o desplazamiento se relaciona al desplazamiento del pistón durante el ensayo.

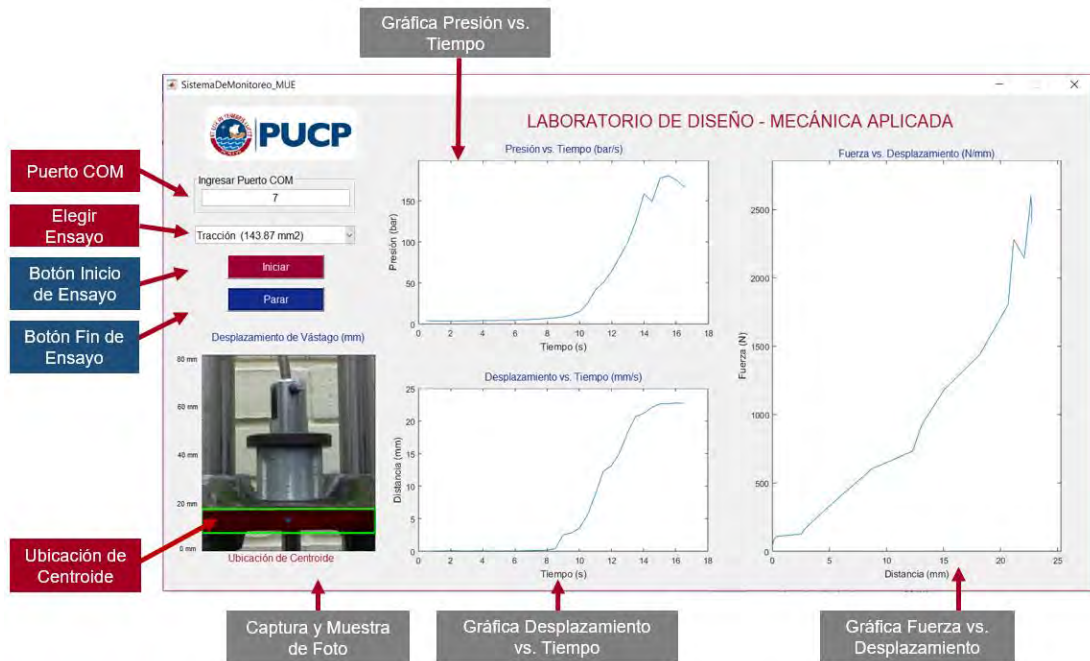
Inmediatamente, se procede a leer la presión del sistema que envía el controlador, esta variable se convierte en fuerza multiplicando la presión por el valor del área del pistón según de tipo de ensayo. Seguidamente, se grafica las siguientes relaciones: Desplazamiento, Presión vs. Tiempo, Desplazamiento vs. Tiempo y finalmente Fuerza vs. Desplazamiento en un mismo instante.

Este proceso se repite hasta que el usuario detenga el ensayo. Cuando se culmina el ensayo se genera un archivo Excel con los valores obtenidos de presión, fuerza, distancia durante el ensayo, con estos se analiza el comportamiento de material ensayado en el tiempo.

### **Diseño de la interfaz Gráfica**

La Interfaz gráfica de usuario (GUI) se desarrolló en la interfaz GUIDE de MATLAB, se utilizaron las librerías de Matlab para la creación de íconos, botones y gráficos necesarios que se muestra en la figura 3.3.21. Seguidamente, el software de Matlab generó un archivo “.m” que es un programa que comprende un programa principal y las “n” funciones que corresponden a los elementos de la parte gráfica, siguiendo la estructura del código generado se procedió a modificar las funciones de la interfaz para que pueda interactuar con los demás componentes del sistema de monitoreo.

A continuación, en la figura 3.3.21 se presenta la estructura de la interfaz gráfica desarrollada, la cual está conformada por cuatro ventanas y botones. Los botones que se encuentran en la sección izquierda de la interfaz cumplen las siguientes funciones:



**Figura 3.3.21 Interfaz gráfica de usuario- Ventana Principal**

*Fuente: Elaboración propia*

**a) Botón de Selección de Ensayo:** Al seleccionar el tipo de ensayo de compresión o tracción, solo se escoge el factor de conversión de presión (bar) a fuerza (N).

**a) Botón “Iniciar”:** Inicia la adquisición de datos de presión y conversión de unidades según el ensayo elegido, y el cálculo de distancia por comparación de posición del centroide. Los valores registrados empiezan a ser graficados en las siguientes relaciones: presión vs. tiempo, distancia vs. tiempo, y fuerza vs desplazamiento, en las gráficas de la sección derecha. Mientras, en la sección izquierda, se muestra la ubicación del centroide del objeto analizado.

**b) Botón “Parar”:** Al presionar este botón, se finaliza la recepción de datos. Además, se genera un archivo en Excel que exporta los datos obtenidos de las variables de interés: fuerza, desplazamiento y presión.

En conclusión, las funciones que se desarrollarán serán: selección de ensayo, inicio y fin del ensayo; que comprenden cálculos de desplazamiento por visión por computadora (centroide), la lectura de presión que envía el controlador por comunicación serial, y transmisión de datos de distancia al controlador. Finalmente, se realizan las conversiones correspondientes y se grafican las relaciones en cuestión: Presión vs. Tiempo, Desplazamiento vs. Tiempo, y Fuerza vs. Desplazamiento.

## **CAPÍTULO IV: MONTAJE GENERAL Y PRUEBAS**

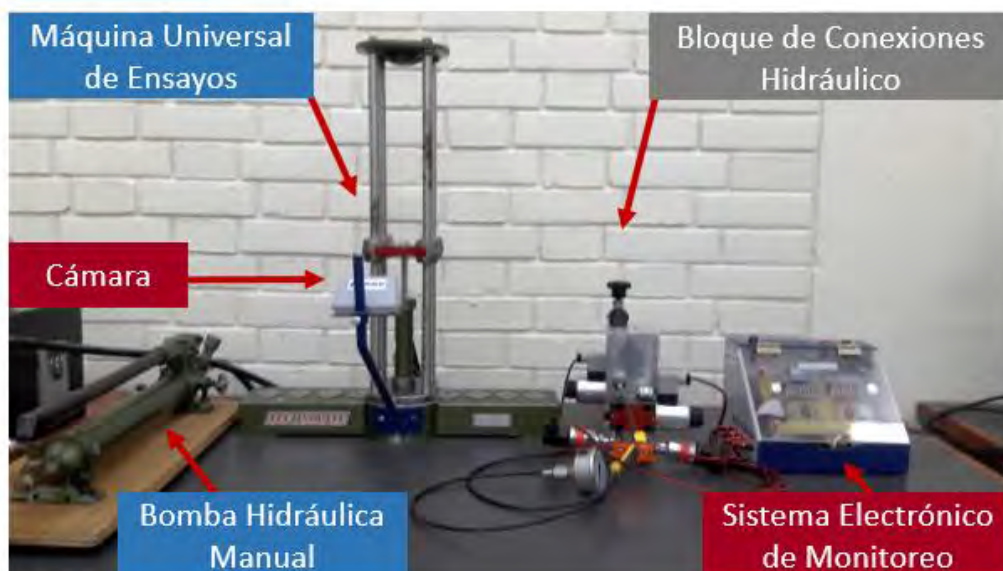
En el presente capítulo se presentarán el montaje general del bloque de conexiones hidráulico implementado y el sistema de monitoreo propuesto. Además, se presentarán las pruebas o ensayos realizados en el proceso de implementación del Sistema de Monitoreo para una Máquina Universal de Ensayos, con sus respectivos resultados obtenidos.

Los ensayos a realizarse son los siguientes:

- Ensayos de sensores
- Ensayos de la etapa de comunicación
- Ensayo de la etapa de control
- Ensayos de la etapa de procesamiento
- Ensayos del sistema completo

### **4.1 Integración de la parte mecánica y electrónica**

El bloque de conexiones hidráulico ha sido montado en la planta (máquina universal de ensayos) como se muestra en la figura 4.1.1. El bloque de conexiones hidráulico se conecta entre el agente generador de presión (bomba hidráulica manual) y la entrada del cilindro de doble efecto de la planta (máquina universal de ensayos).



**Figura 4.1.1 Montaje Mecánico**

*Fuente: Elaboración propia*

## **4.2 Ensayos del Sistema de Monitoreo**

### **4.2.1 Ensayos de Sensores**

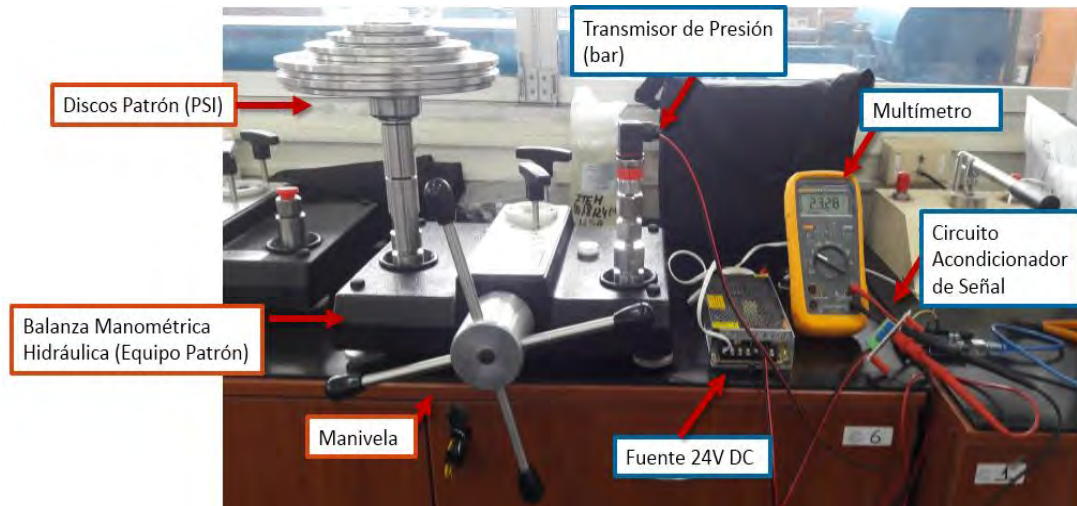
Después de realizar el diseño de los módulos de medición en el capítulo anterior y su implementación, se procede a realizar las pruebas de los sensores seleccionados para verificar que responden según lo especificado por el fabricante y evaluar si cumplen con los requerimientos de la presente tesis.

#### **4.2.1.1 Ensayo de Sensor de Presión Calibración de Sensores**

En este ensayo, se busca calibrar los sensores de presión seleccionados en la etapa de diseño. El objetivo de la calibración es comprobar la lectura del sensor en bares con la de un equipo patrón, de tal manera se asegure una correcta lectura de estos. Los equipos objeto de calibración son los transmisores de presión Danfoss MBS 3000 de 0 a 60 bar y Danfoss MBS 3050 de 0 a 600 bar, para lo cual se utilizó una balanza manométrica hidráulica 580 SERIES (Marca: DH BUDENBERG) de 0-1200 bar, equipo patrón de presión propiedad del Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Para llevar a cabo la calibración, se conecta el transmisor de presión al extremo derecho del equipo y al extremo izquierdo se colocan discos metálicos de diferentes tamaños y pesos desde 2 PSI hasta 2000 PSI como se observa en la Figura 4.2.1. Es importante indicar que a cada disco le corresponde dos pesos diferentes según el punto de calibración seleccionado, por ejemplo: si un disco tiene labrado '100 PSI / 1000 PSI', entonces si se calibra en la primera línea indicadora (línea azul) el peso que tiene el disco ante el sistema es de 100 PSI, y si se sigue aumentando la presión y se calibra en la segunda línea indicadora (línea roja) se tiene un peso 1000 PSI para el sistema. En consecuencia, se colocan estas pesas hasta llegar al valor deseado, luego se ajusta y hace girar la manivela en sentido horario para ejercer presión en el sistema, hasta llegar hasta la primera o segunda línea indicadora, dependiendo del peso deseado en el disco.

En ese instante se mide la señal de voltaje que se tiene a la salida del circuito de acondicionamiento de señal que está conectado al sensor, para lo cual se usa multímetro Fluke 28 II y se anota los valores obtenidos. Luego, se añade o retira los discos necesarios para calibrar el sensor en el siguiente valor de PSI deseado, este proceso se repite "n" veces según el número de muestras que se desea obtener.



**Figura 4.2.1 Montaje de sensor de presión en el equipo patrón**

*Fuente: Elaboración Propia*

**a. Calibración Transmisor de presión 0-60 bar**

Para la calibración de este sensor, se ha considerado que 13 puntos de medición serán suficientes para comprobar la linealidad de la señal de salida del sensor, y comprobar que el porcentaje de error relativo (%) de la medición sea aceptable.

Para la calibración se utilizan discos metálicos con valores enteros de PSI, entonces los valores de presión en bar se deben convertir de bar a PSI considerando un factor de 1.45038, luego estos valores deben aproximan al valor de número entero más cercano como se muestra en la tabla 4.2.1.

**Tabla 4.2.1: Selección de valores de PSI para calibración (0-60 bar)**

Presión Propuesta (bar)	Presión Propuesta (PSI)	Presión Patrón (PSI)	Presión Patrón (bar)	Voltaje Patrón (V)
0	0.000	0	0	1.000
5	72.519	73	5.033	1.336
10	145.038	145	9.997	1.666
15	217.557	218	15.031	2.002
20	290.076	290	19.995	2.333
25	362.595	363	25.028	2.669
30	435.114	435	29.992	2.999
35	507.633	508	35.025	3.335
40	580.152	580	39.990	3.666
45	652.671	653	45.023	4.002
50	725.190	725	49.987	4.332
55	797.709	798	55.020	4.668
60	870.228	870	59.984	4.999

*Fuente: Elaboración propia*



Luego de establecer los valores patrón de presión (PSI), se procede colocar los discos metálicos patrones suficientes para generar la presión (PSI) que se desea analizar. Seguidamente, se ajusta la manivela para ejercer la presión deseada en el sensor hasta la línea indicadora de interés (azul o roja), y se mide el valor de voltaje a la salida del transmisor. Este proceso se realiza 8 veces: 4 ensayos aumentando la presión (0 a 60 bar) y 4 ensayos disminuyendo la presión (60 a 0 bar). En la tabla 4.2.2 se presentan el Promedio de los “Resultados de Calibración de Sensor de Presión” y para mayor detalle de los 04 ensayos revisar en el ANEXO 20.

**Tabla 4.2.2 Resultados Promedio-Calibración de Sensor de Presión (0- 60 bar)**

Presión Patrón (PSI)	Voltaje Patrón (V)	Voltaje Subida (V)	Voltaje Bajada (V)	% Error Subida	% Error Bajada
0	1.000	0.998	0.998	0.25	0.25
73	1.336	1.327	1.326	0.62	0.71
145	1.666	1.647	1.650	1.17	1.00
218	2.002	1.973	1.971	1.46	1.58
290	2.333	2.297	2.292	1.54	1.77
363	2.669	2.614	2.615	2.03	2.02
435	2.999	2.928	2.932	2.37	2.26
508	3.335	3.255	3.256	2.41	2.38
580	3.666	3.569	3.568	2.64	2.69
653	4.002	3.889	3.887	2.81	2.86
725	4.332	4.201	4.202	3.05	3.01
798	4.668	4.522	4.519	3.13	3.20
870	4.999	4.960	4.964	0.77	0.70

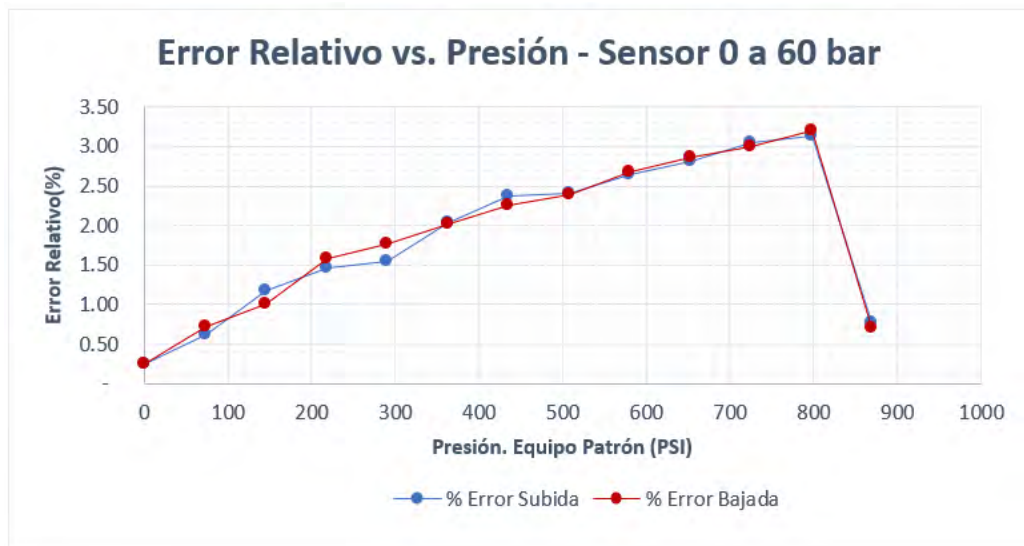
*Fuente: Elaboración propia*

El porcentaje de error relativo fue calculado de la siguiente manera:

$$\% \text{ Error Relativo} = \frac{\text{Valor}_{\text{REAL}} - \text{Valor}_{\text{MEDIDO}}}{\text{Valor}_{\text{REAL}}} * 100$$

Según los datos obtenidos del ensayo promedio, en la tabla 4.2.2 se observa que durante el “Ensayo de Subida” (aumento de presión), el porcentaje de error relativo máximo es de 3.13% para una presión de 798 PSI, y el porcentaje error relativo mínimo es de 0.25% para una presión de 0 PSI. Mientras que durante el “Ensayo de Bajada” (disminución de presión), el porcentaje de error relativo máximo es de 3.20% para una presión de 798 PSI, y el porcentaje error relativo mínimo es de 0.25% para una presión de 0 PSI. En consecuencia, se observa que el error relativo promedio

tiende a aumentar conforme la presión del sistema aumenta, salvo en 870 PSI que disminuye el error relativo considerablemente.



**Figura 4.2.2 Gráfica de %Error Relativo vs. Presión (PSI)**

*Fuente: Elaboración propia*

En consecuencia, el sensor de presión seleccionado permite obtener mediciones bastante aceptables teniendo en cuenta que se emplea un circuito acondicionamiento de señal a la salida del sensor; además, se comprueba la señal eléctrica del sensor presenta un comportamiento lineal, como lo asegura el fabricante.

#### **b) Calibración Transmisor de presión 0-600 bar**

Para la calibración de este sensor, se ha considerado que 13 puntos de medición serán suficientes para comprobar la linealidad de la señal de salida del sensor, y comprobar que el porcentaje de error relativo (%) de medición sea aceptable.

Para la calibración se utilizan discos metálicos con valores enteros de PSI, entonces los valores de presión en bar se deben convertir de bar a PSI considerando un factor de 1.45038, luego estos valores deben aproximan al valor de número entero más cercano como se muestra en la tabla 4.2.3.

**Tabla 4.2.3 Selección de valores de PSI para calibración (0-600 bar)**

Presión Propuesta (bar)	Presión Propuesta (PSI)	Presión Patrón (PSI)	Presión Patrón (bar)	Voltaje Patrón (V)
0	0.000	0	0.000	1.000
50	725.190	726	50.056	1.334
100	1450.380	1450	99.974	1.666
150	2175.570	2176	150.030	2.000
200	2900.760	2900	199.948	2.333
250	3625.950	3626	250.003	2.667
300	4351.140	4352	300.059	3.000
350	5076.330	5076	349.977	3.333
400	5801.520	5802	400.033	3.667
450	6526.710	6526	449.951	4.000
500	7251.900	7252	500.007	4.333
550	7977.090	7978	550.063	4.667
600	8702.280	8702	599.981	5.000

*Fuente: Elaboración propia*

Luego de establecer los valores patrón de presión (PSI), se procede colocar los discos metálicos patrones suficientes para generar la presión (PSI) que se desea analizar. Seguidamente, se ajusta la manivela para ejercer la presión deseada en el sensor hasta la línea indicadora de interés (azul o roja), y se mide el valor de voltaje a la salida del transmisor. Este proceso se realiza 8 veces: 4 ensayos aumentando la presión (0 a 600 bar) y 4 ensayos disminuyendo la presión (600 a 0 bar). En la tabla 4.2.4 se presentan el promedio de los resultados de calibración del sensor de alta presión, para mayor detalle de los Ensayos revisar en el ANEXO 24.

**Tabla 4.2.4 Resultados Promedio de Calibración-Sensor de Presión (0-600 bar)**

Presión Patrón (PSI)	Voltaje Patrón (V)	Voltaje Subida (V)	Voltaje Bajada (V)	% Error Subida	% Error Bajada
0	1.000	0.999	0.999	0.125	0.150
726	1.334	1.324	1.327	0.709	0.540
1450	1.666	1.651	1.654	0.930	0.765
2176	2.000	1.976	1.979	1.222	1.085
2900	2.333	2.297	2.302	1.542	1.317
3626	2.667	2.631	2.627	1.338	1.479
4352	3.000	2.968	2.965	1.096	1.188
5076	3.333	3.302	3.298	0.950	1.047
5802	3.667	3.638	3.636	0.795	0.836
6526	4.000	3.970	3.970	0.754	0.748
7252	4.333	4.312	4.310	0.493	0.551
7978	4.667	4.655	4.648	0.270	0.409
8702	5.000	4.991	4.985	0.187	0.302

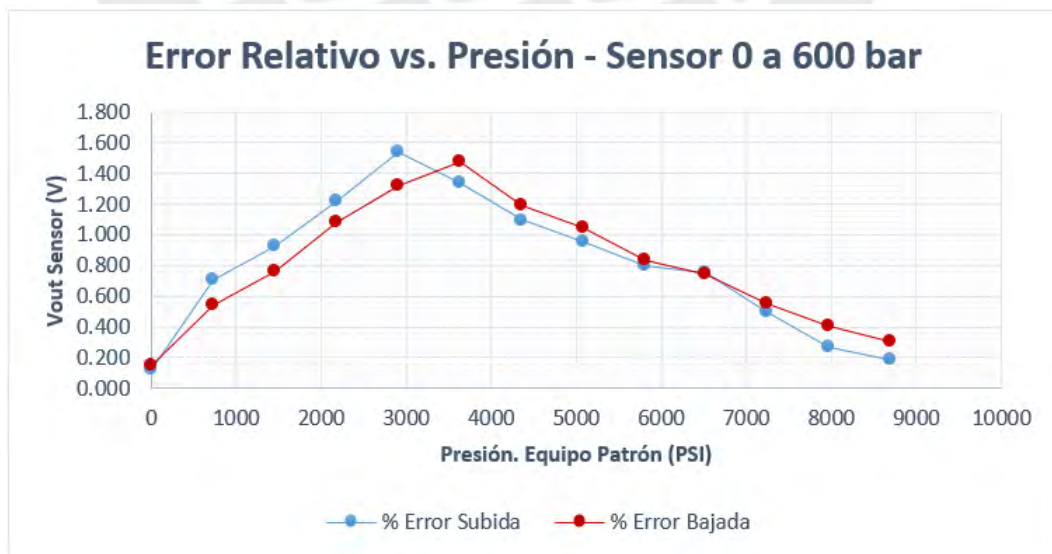
*Fuente: Elaboración propia*

El porcentaje de error relativo se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Error Relativo} = \frac{\text{Valor}_{REAL} - \text{Valor}_{MEDIDO}}{\text{Valor}_{REAL}}$$

Según los datos obtenidos del ensayo, en la figura 4.2.4 se observa que durante el “Ensayo de Subida” (aumento de presión), el porcentaje de error relativo máximo es de 1.542% para una presión de 2900 PSI, y el porcentaje de error relativo mínimo es 0.125 para una presión de 0 PSI. Mientras que durante el “Ensayo de Bajada” (disminución de presión), el porcentaje de error relativo máximo es de 1.479% para una presión de 3626 PSI, y el porcentaje de error relativo mínimo es de 0.150% para una presión de 0 PSI.

Analizando el comportamiento de la figura 4.2.3 en el “Ensayo de Subida”, el error relativo creciente de 0 a 2900 PSI, y un error relativo decreciente de 2900 hasta 8700 PSI. Mientras que durante el “Ensayo de Bajada” (disminución de presión), el error relativo creciente de 0 a 3626 PSI, y un error relativo decreciente de 3626 hasta 8700 PSI. Este comportamiento se presenta debido que para estos casos se utilizan escalas diferentes de calibración, para el intervalo de 0 a 3626 PSI se utilizó la primera línea indicadora de calibración (azul) y en el rango de 3626 a 8700 PSI se utilizó la segunda línea de calibración (roja). Entonces, en la primera etapa se observa en la figura 4.2.3 se presenta una tendencia lineal creciente del error relativo; mientras que en la segunda etapa se presenta una tendencia decreciente del error relativo para ambos ensayos de subida y bajada; por lo que se deduce que el error relativo presenta un comportamiento lineal por tramos.



**Figura 4.2.3 Gráfica de %Error Relativo vs. Presión (PSI)**

*Fuente: Elaboración propia*

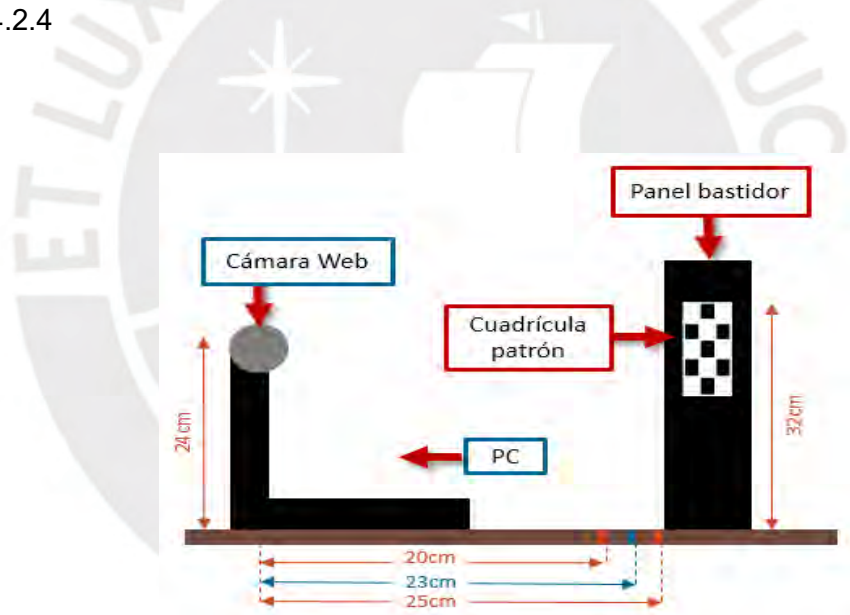
En consecuencia, el sensor de presión seleccionado permite obtener mediciones bastante aceptables teniendo en cuenta que se emplea un circuito acondicionamiento de señal a la salida del sensor; además, se comprueba la señal eléctrica del sensor presenta un comportamiento lineal, como lo asegura el fabricante.

#### 4.2.1.2 Ensayo de Sensor Distancia

##### a. Cálculo de Factor de conversión pixel a mm

Para desarrollar esta prueba se utilizó un bastidor de 40 x 32 cm, una regla métrica, cuadrícula patrón de 12 x 12 cm con divisiones de 1 x 1 cm, la cual previamente se dibujó y coloreó usando una hoja milimetrada y un plumón negro de punta delgada.

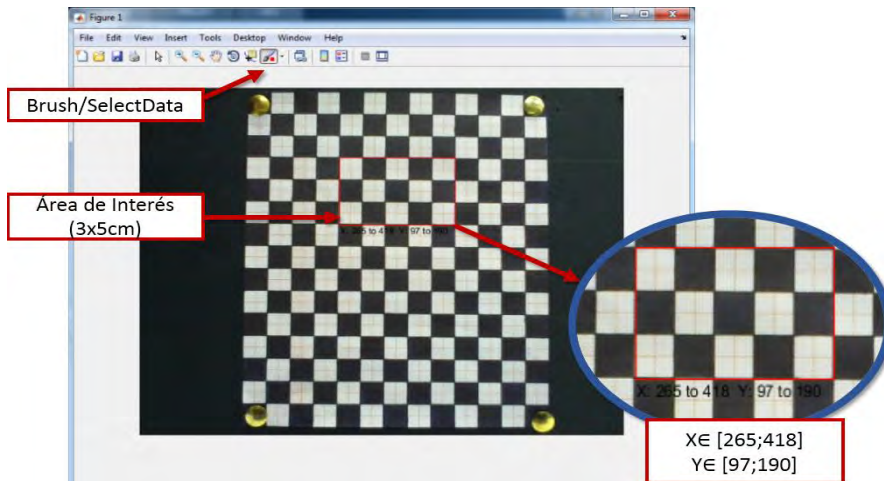
El montaje de los componentes es el siguiente: la cámara se ubicó a la altura de 24 cm y la cuadrícula patrón se ubicó en la parte central superior del bastidor a 32 cm de altitud y a 23 cm de longitud de la cámara, como se muestra en la figura 4.2.4



**Figura 4.2.4 Ubicación de componentes: Calibración de cámara**

*Fuente: Elaboración propia*

Primero, se procedió a capturar y mostrar fotos de la cuadrícula patrón, y con ayuda de la herramienta 'Brush/SelectData' de Matlab, se realizó la medición en pixeles de un área de interés de la cuadrícula patrón (3 x 5 cm), como se muestra en la figura 4.2.5.



**Figura 4.2.5 Muestra 'n': Cálculo factor pixel a mm**

*Fuente: Elaboración propia*

Para este caso, se consideró que 10 muestras serían suficientes para poder realizar el análisis. Para cada muestra, se anotó los valores de x e y en pixeles, se calculó que el factor equivalente promedio de pixel a mm en el eje Y es de **0.325** como se observa en la Tabla 4.2.5, y se calculó un error relativo máximo modular es **2.147%** como se observa en la tabla 4.2.6, lo que asegura que el factor promedio calculado (mm/pixel) según estas condiciones es bastante aceptable.

**Tabla 4.2.5 Tabla de Conversión pixel a mm**

	Coordenada X		Coordenada Y		Factor Promedio (mm/pixel)	
	X1	X2	Y1	Y2	X prom	Y prom
<b>Muestra 01</b>	266	417	96.7	191	0.331	0.318
<b>Muestra 02</b>	265	418	97	191	0.327	0.319
<b>Muestra 03</b>	265	417	97	189	0.329	0.326
<b>Muestra 04</b>	265	418	97	189	0.327	0.326
<b>Muestra 05</b>	265	418	97	189	0.327	0.326
<b>Muestra 06</b>	265	418	128	220	0.327	0.326
<b>Muestra 07</b>	260	417	98	189	0.318	0.330
<b>Muestra 08</b>	266	418	98	189	0.329	0.330
<b>Muestra 09</b>	265	418	97	189	0.327	0.326
<b>Muestra 10</b>	265	418	128	221	0.327	0.323
<b>Factor Promedio (X,Y)</b>					0.327	<b>0.325</b>

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4.2.6 Error Relativo de Calibración de Sensor Distancia Eje Y**

	Distancia (pixel)	Distancia (mm)	Valor Teórico	% Error Relativo
	$\Delta Y$	Y	Y	Y
Muestra 01	94.3	30.644	30	-2.147
Muestra 02	94	30.547	30	-1.822
Muestra 03	92	29.897	30	0.344
Muestra 04	92	29.897	30	0.344
Muestra 05	92	29.897	30	0.344
Muestra 06	92	29.897	30	0.344
Muestra 07	91	29.572	30	1.428
Muestra 08	91	29.572	30	1.428
Muestra 09	92	29.897	30	0.344
Muestra 10	93	30.222	30	-0.739

*Fuente: Elaboración propia*

### **b. Calibración de sensor de Distancia**

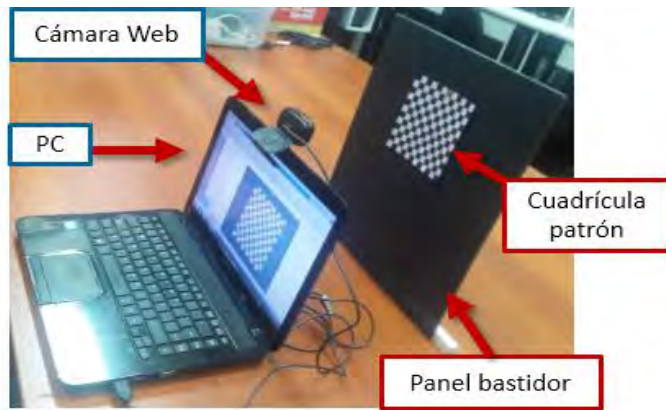
A continuación, se presentarán dos tipos de calibración por software, e instrumental (equipo patrón),

#### **b.1 Calibración del sensor de Distancia (Software Matlab)**

En este ensayo, se busca calibrar el sensor de distancia: HD WEBCAM LOGITECH C525. El objetivo de la calibración es calcular el error medio en pixeles utilizando la aplicación de 'Single Camera Calibration' de Matlab.

En el proceso de calibración usando la aplicación 'Single Camera Calibration' de Matlab se encuentra detallado en la página web de Matlab [43]. Este último consiste en tomar "n" fotos a una cuadrícula patrón en diferentes posiciones, de tal manera se realice un análisis en 3D, y se calcule el error promedio en pixeles. Para lo cual se hizo girar la cuadrícula patrón haciendo variar de posición en el eje x y eje y; y en el caso de eje z se desplazará dentro rango longitud focal de interés, para este caso el rango es 20 a 25 cm.

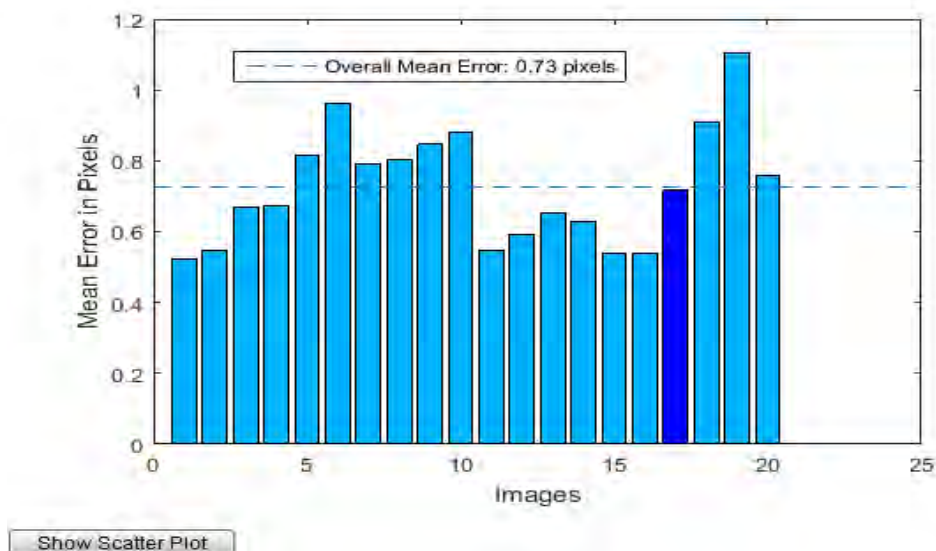
Entonces, luego de realizar el montaje como se observa en la figura 4.2.4 y figura 4.2.6 se ejecuta en Matlab la línea de comandos: 'cameraCalibrator', inmediatamente se abre una pantalla. Seguidamente, se selecciona 'CAPTURAR' fotografía desde cámara web, se indica el número de muestras (20 muestras), y se inicia el ensayo según el procesamiento antes mencionado. Luego de tomarse las 20 fotos de muestra, se selecciona el tamaño de cada cuadrado para este caso es de 1 cm o 10 mm, y se selecciona 'CALIBRAR'.



**Figura 4.2.6 Montaje para calibración de cámara web Logitech C525**

*Fuente: Elaboración propia*

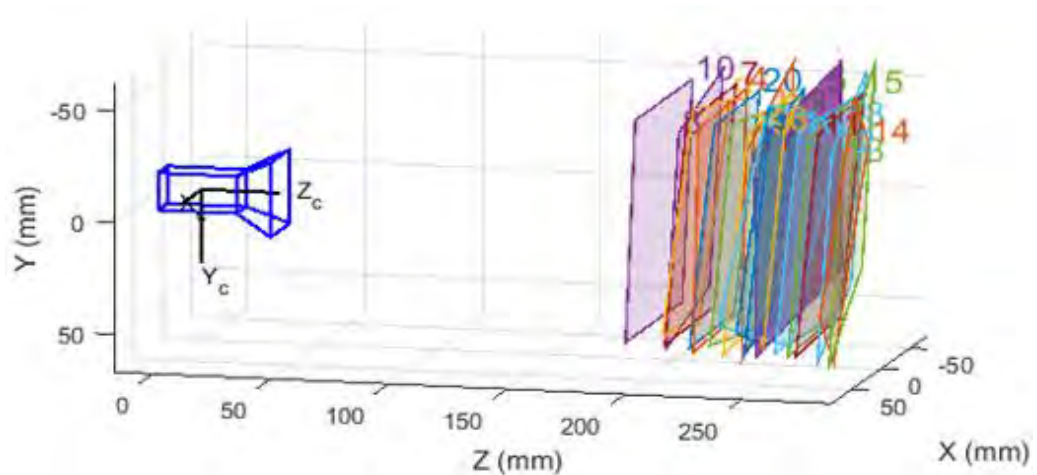
Finalmente, se obtiene la siguiente información de errores estándares de estimación como error promedio en pixeles es 0.73 pixeles, usando el factor de conversión previamente calculado **0.325 mm/pixel** se calcula que el error medio de la calibración es 0.237 mm aproximadamente (ver figura 4.2.7) y parámetros extrínsecos como distancia focal promedio es de 20 a 25 cm, según lo establecido en el ensayo (ver figura 4.2.8). Para mayor detalle, en ANEXO 15 se encuentra el código fuente generada y las muestras capturadas.



**Figura 4.2.7 Error Promedio en Pixeles**

*Fuente: Elaboración propia*



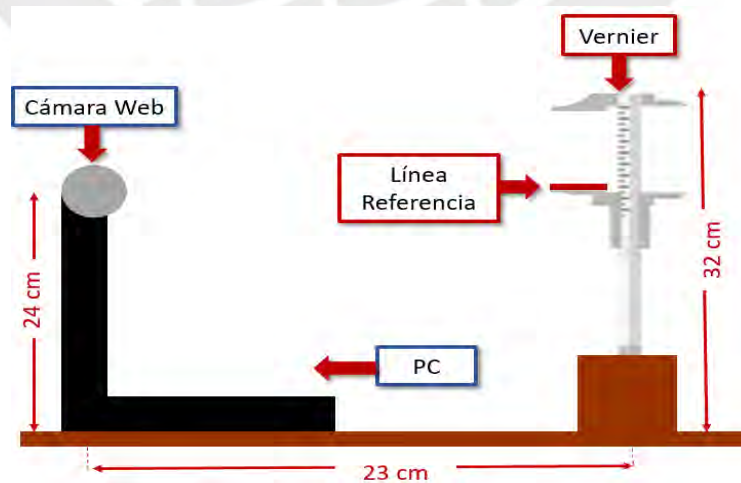


**Figura 4.2.8 Evaluación de parámetros extrínsecos (Distancia focal)**

Fuente: Elaboración propia

### **b.2 Calibración de sensor de Distancia (Vernier)**

La primera calibración fue realizada con la aplicación de 'Single Camera Calibration' de Matlab" como no se utilizó un equipo patrón sino un algoritmo, la medición del error no es del todo confiable. En consecuencia, se realizó una segunda calibración utilizando como equipo patrón un vernier de resolución de 0.5 mm. Para la calibración de este sensor, se ha considerado que 20 puntos de medición (5 mm a 100 mm) serán suficientes para comprobar que el porcentaje de error relativo (%) de medición sea aceptable. Para la calibración se ha considerado utilizar una línea o cinta de referencia que se encuentra adherida en el extremo del "pie móvil o mordaza para medidas externas del vernier", y se realiza el montaje para la calibración como se observa en la Figura 4.2.9.



**Figura 4.2.9 Ubicación de componentes: Calibración de cámara (vernier)**

Fuente: Elaboración propia

Luego de establecer los valores patrón de distancia (mm), se procede realizar los 8 ensayos: 4 ensayos de aumento de longitud de 5 a 100 mm y 4 ensayos de disminución de longitud de 100 mm a 5 mm. Para lo cual se mueve el “pie móvil del vernier” ajustando a los valores de longitud patrón (mm) que se desea medir, y luego se activa la cámara para medir y registrar los datos obtenidos. En la tabla 4.2.7 se presentan el Promedio de los Resultados de Calibración de Sensor de Distancia” y para mayor detalle de los Ensayos revisar en el ANEXO 25.

**Tabla 4.2.7 Resultados Promedio de Calibración-Sensor Distancia (5-100 mm)**

Longitud Patrón (mm)	Longitud Subida (mm)	Longitud Bajada (mm)	Error Súbida (%)	Error Bajada (%)
5	5.01	4.97	- 0.13	0.52
10	9.98	9.98	0.24	0.20
15	15.02	15.09	- 0.14	- 0.62
20	20.00	19.97	0.02	0.17
25	24.98	25.00	0.08	0.00
30	30.05	29.99	- 0.17	0.03
35	34.87	35.00	0.37	- 0.00
40	40.06	40.03	- 0.15	- 0.09
45	45.04	45.02	- 0.10	- 0.05
50	49.99	50.01	0.02	- 0.03
55	54.99	54.98	0.02	0.04
60	59.94	60.00	0.10	- 0.00
65	64.99	65.01	0.01	- 0.02
70	70.06	70.02	- 0.09	- 0.03
75	74.94	75.03	0.08	- 0.04
80	80.09	80.05	- 0.12	- 0.06
85	84.96	85.04	0.05	- 0.05
90	90.01	90.04	- 0.01	- 0.04
95	94.98	95.00	0.02	0.00
100	100.04	100.04	- 0.04	- 0.04

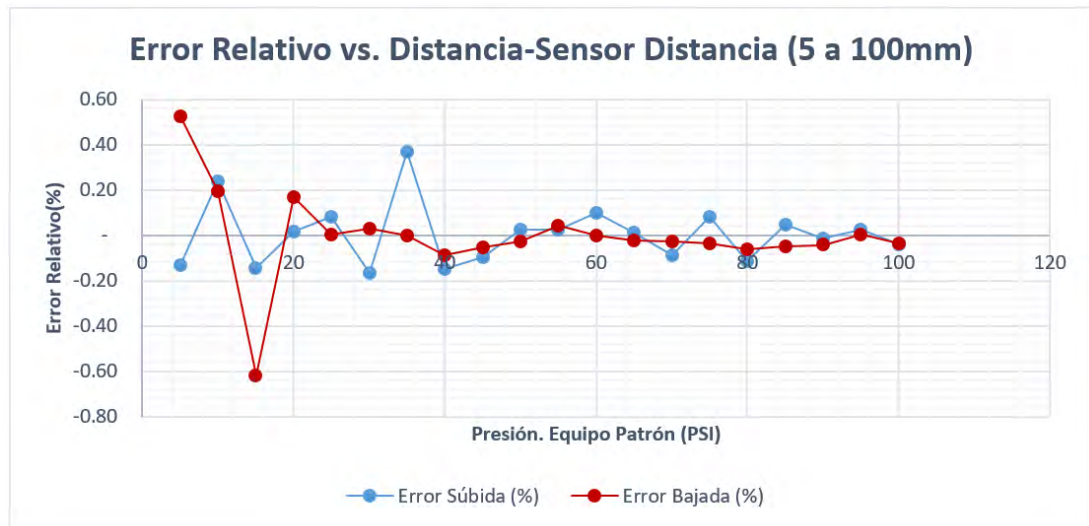
Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de error relativo se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Error Relativo} = \frac{\text{Valor}_{REAL} - \text{Valor}_{MEDIDO}}{\text{Valor}_{REAL}}$$

Según los datos obtenidos del ensayo promedio, en la tabla 4.2.6 se observa que durante el “Ensayo Promedio de Subida”, el porcentaje de error relativo máximo es de 0.37% para una distancia de 35 mm, y el porcentaje de error relativo mínimo de

-0.17% para una distancia de 30 mm. Mientras que durante el “Ensayo de Bajada” (disminución de presión), el porcentaje de error relativo máximo es de 0.52% para una distancia 5 mm, y el porcentaje de error relativo mínimo es de -0.62% para una distancia de 15 mm. En consecuencia, se observa que el error relativo no tiene un comportamiento lineal, sino oscilante entre sus valores máximo y mínimo como se observa en la figura 4.2.10.



**Figura 4.2.10 Gráfica de %Error Relativo vs. Distancia (mm)**

*Fuente: Elaboración propia*

Se concluye que el sensor de distancia seleccionado permite obtener mediciones bastante aceptables debido al error de medición es mínimo.

#### 4.2.2 Ensayos de la etapa de comunicación

El sistema de monitoreo para una máquina universal de ensayo está conformado principalmente por un sistema de sensores, controlador y computadora personal (PC), como se observa en la figura 4.2.11. El medio de comunicación utilizado es un cable USB 2.0 con conector tipo A/B para comunicación serial, el cual se conecta al microcontrolador y el otro extremo al puerto USB de la PC.

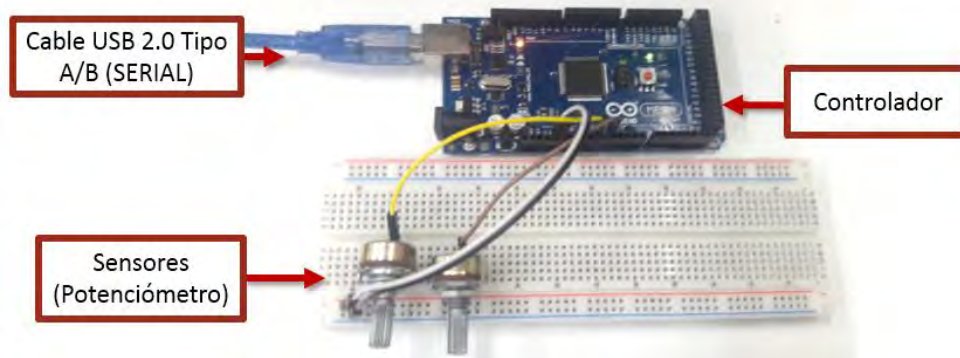


**Figura 4.2.11 Diagrama de Bloques: prueba Etapa de Comunicación**

*Fuente: Elaboración propia*

### Prueba de Conectividad

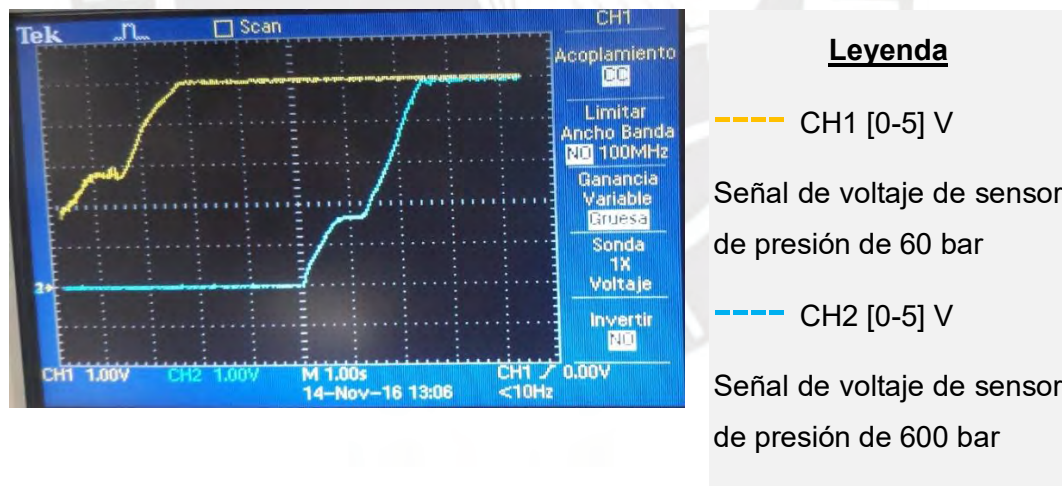
Para el desarrollo de esta prueba, será necesario la tarjeta de desarrollo Arduino 2560, cable USB 2.0 tipo A/B para comunicación serial y dos potenciómetros conectado a 5 V, estos simularán la entrada analógica variable de los transmisores de presión de 0-60 bar y de 0-600 bar, según el montaje realizado en la figura 4.2.12.



**Figura 4.2.12 Circuito de Prueba- Comunicación Serial**

*Fuentes: Elaboración propia*

En la figura 4.2.13 se muestra el voltaje de salida de cada una de las señales que varían de 0 a 5 V, estas señales voltaje analógico corresponde a las entradas del conversor análogo digital (ADC), las cuales por programación son escaladas de 0 a 60 bar o 0 a 600 bar según sea el caso.

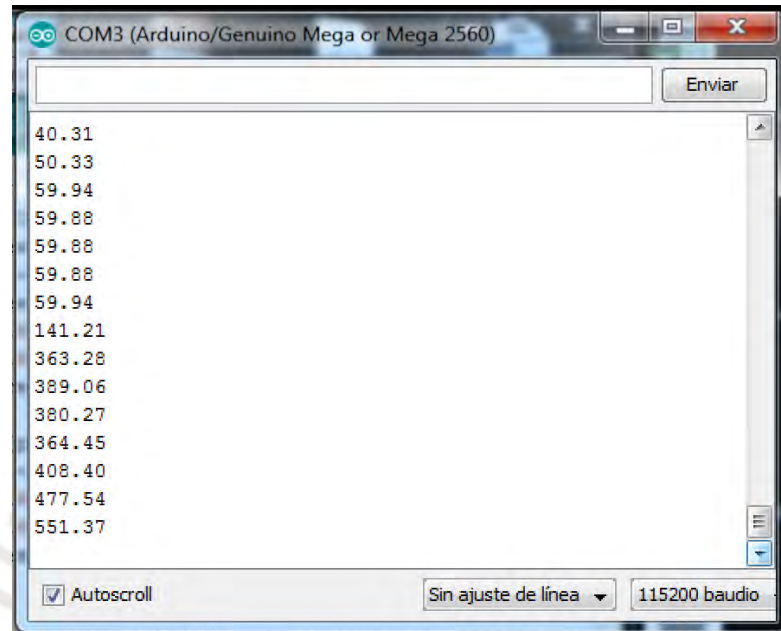


**Figura 4.2.13 Señales de voltaje de sensores de presión**

*Fuentes: Elaboración propia*

Según el programa desarrollado para una lectura de presión menor a 60 bares se considera la lectura del sensor de baja presión (0 - 60 bar) y se omite la lectura del sensor de alta presión (0 - 600 bar). Análogamente, para una lectura de presión mayor a 60 bares se considera la lectura del sensor de alta presión y se omite la lectura del sensor de baja presión. En consecuencia, el valor de la variable de presión

es una de las dos señales de los sensores como se observa en la figura 4.2.14, por lo que se demuestra el buen funcionamiento de la tarjeta de desarrollo y la correcta comunicación entre la tarjeta de desarrollo y al ordenador.



**Figura 4.2.14 Valores de Presión del Sistema: lectura de señal de sensores de presión (0 - 60 bar) y (0 - 600 bar)**

*Fuentes: Elaboración propia*

### **Prueba de velocidad**

El objetivo de este ensayo es verificar la velocidad máxima de transmisión de la red para la cual no ocurren errores. Inicialmente se consideró utilizar una velocidad de transmisión de 9 600 bps, sin embargo, se apreció que se presentaba un retardo en la transmisión y recepción de datos. Es por ello, que se aumentó la velocidad de transmisión a 115 200 bps, teniendo como resultado una mejor respuesta en el tiempo del sistema de monitoreo, debido a que las gráficas son instantáneas.

Para la configuración de la velocidad de transmisión de información, se consideró lo siguiente:

Velocidad de transmisión: 115200 baudios

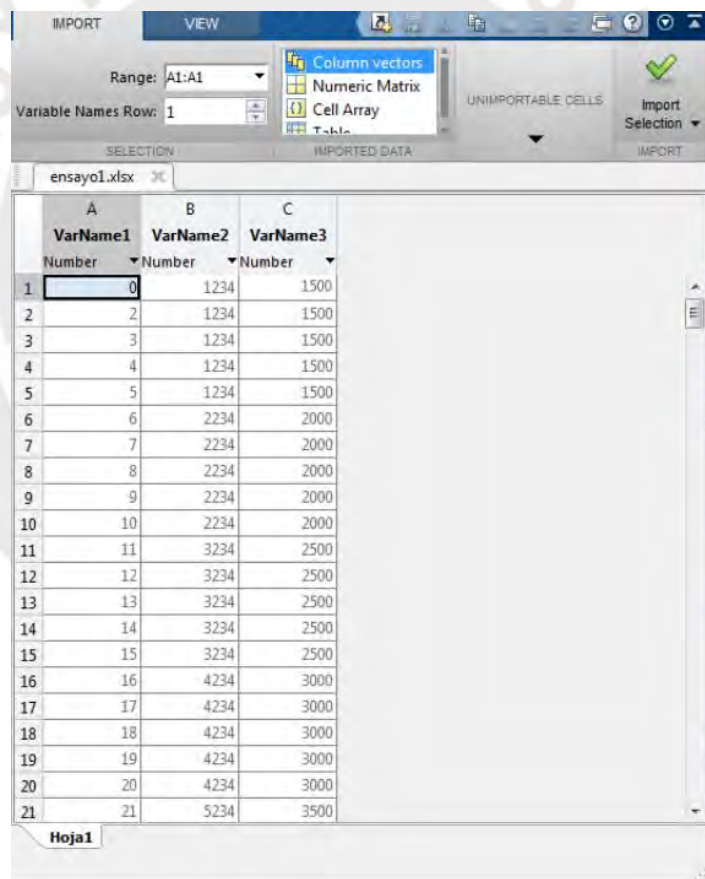
Número de bits: 9

Paridad: Ninguna

Bits de Parada: 1

Para esto, se desarrolla un programa de prueba en Arduino IDE que envíe un número fijo y se actualice cada 5 muestras, este valor representará al parámetro de presión. Además, la interfaz gráfica debe responder a estos incrementos de presión presentado con un aumento en la variable de distancia.

Como se muestra en la figura 4.2.15 se presenta la tabla de resultados de los valores de presión y distancia que son recibidos y procesados por la etapa de procesamiento de la interfaz gráfica. Esta tabla contiene los valores de números de muestra en la columna uno, valor presión en la columna dos y valor de distancia en la columna tres. Con el desarrollo de la prueba se comprueba que cada 5 valores se presenta un aumento de presión; en consecuencia, la distancia incrementa con cada variación tal como se muestra en la imagen. En consecuencia, los valores de lectura de cada parámetro no presentan errores.



The screenshot shows a spreadsheet application window titled 'ensayo1.xlsx'. The spreadsheet has three columns: 'VarName1', 'VarName2', and 'VarName3'. The first column contains sample numbers from 1 to 21. The second column contains pressure values, and the third column contains distance values. The data shows a clear pattern of increasing pressure and distance every 5 samples.

Number	VarName1	VarName2	VarName3
1	0	1234	1500
2	2	1234	1500
3	3	1234	1500
4	4	1234	1500
5	5	1234	1500
6	6	2234	2000
7	7	2234	2000
8	8	2234	2000
9	9	2234	2000
10	10	2234	2000
11	11	3234	2500
12	12	3234	2500
13	13	3234	2500
14	14	3234	2500
15	15	3234	2500
16	16	4234	3000
17	17	4234	3000
18	18	4234	3000
19	19	4234	3000
20	20	4234	3000
21	21	5234	3500

**Figura 4.2.15 Prueba de velocidad a 115200 baudios**

*Fuente: Elaboración propia*

### 4.2.3 Ensayo de la etapa de control

Para los ensayos de etapa de control se han realizar pruebas grupales antes de realizar la prueba final de todo el sistema.

#### a) Circuito Electrónico de visualización

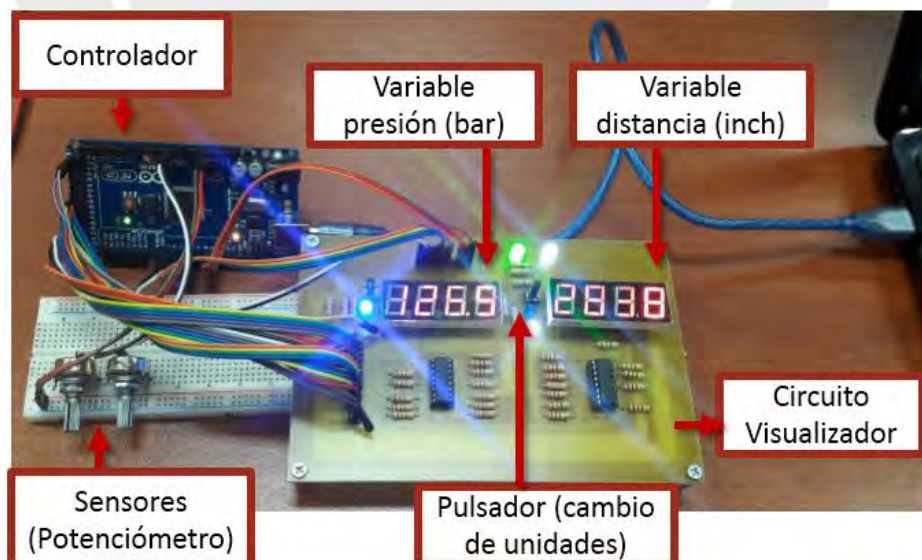
En primer lugar, se ensayó el correcto funcionamiento de tarjeta electrónica de visualización, la cual cumple como objetivo mostrar los valores de presión y distancia en tiempo real. Además, la tarjeta electrónica diseñada comprende: pulsadores para cambiar unidades e indicadores para indicar un correcto funcionamiento del sistema.



**Figura 4.2.16 Diagrama de Bloque: Control de Visualizadores**

*Fuente: Elaboración propia*

Para desarrollar el siguiente ensayo, se genera una entrada variable de 0 a 5 V utilizando potenciómetros. Esta señal analógica leída por el conversor análogo digital (ADC) del controlador, y por medio del programa desarrollado y grabado en la memoria del controlador, esta señal variable de voltaje se convierte en valores de presión o distancia según corresponda.



**Figura 4.2.17 Tarjeta Electrónica de Visualización**

*Fuente: Elaboración propia*

Por defecto la variable de presión se expresa en bares y la variable de distancia se expresa en milímetros. No obstante, si se presiona el pulsador para cambio de unidades de cada variable, se realizará la conversión de unidades de dicha variable. En la figura 4.2.17 se observa que la variable de distancia ha sido convertida de milímetros a pulgadas.

Finalmente, se muestra la variación de cambio de número es rápida menor a 1s, los visualizadores cumplen con los requerimientos de tamaño, buen contraste e iluminación solicitados.

### **b) Circuito Electrónico Control de Válvulas**

En segundo lugar, se ensayó el correcto funcionamiento individual de la tarjeta electrónica de control de válvulas del sistema, la cual cumple como objetivo controlar el encendido o apagado de las válvulas del sistema, las que debe ser activadas por una señal digital.

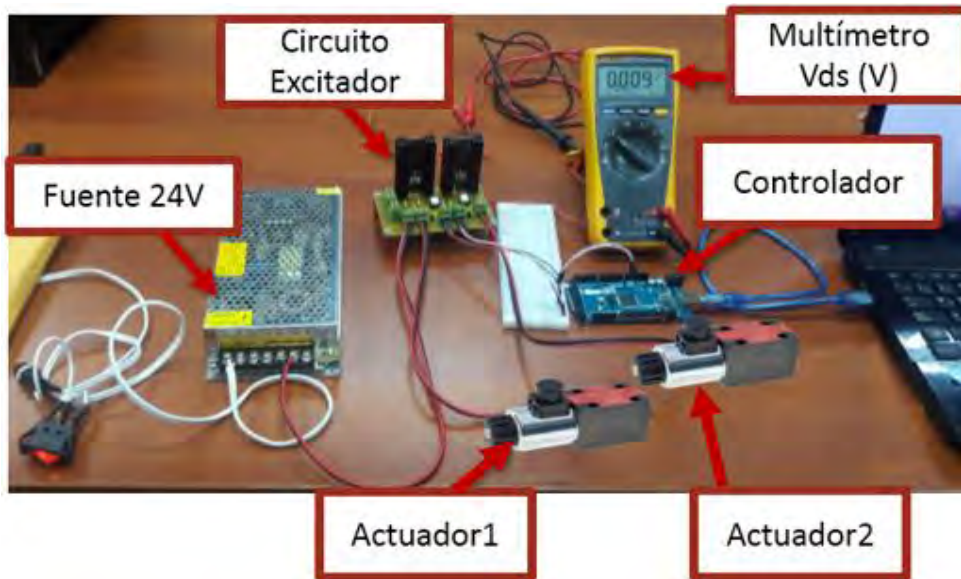


**Figura 4.2.18 Diagrama de Bloque: Control de Válvulas**

*Fuente: Elaboración propia*

Para realizar este ensayo, se utilizó la tarjeta de desarrollo ARDUINO 2560 (controlador), el circuito excitador implementado, los actuadores (válvulas de distribución 4/2 vías de 24 V y 1.2 A) y una fuente conmutada de 24 V como se muestra en la figura 4.2.19, estas cargas serán activados por señales digitales indistintamente.





**Figura 4.2.19 Tarjeta de Control de Válvulas de distribución 4/2 vías**

*Fuente: Elaboración propia*

Se ha desarrollado un programa de prueba para activar o desactivar cada una de las cargas con una señal digital, de tal manera se haga trabajar al mosfet en zona OHMICA o zona de CORTE; es decir que se permita el paso del fluido por el canal A O el canal B de la válvula (apertura o cierre). Finalmente, se analiza los valores obtenidos teóricamente y experimentalmente.

**Tabla 4.2.8 Resultados de Prueba de Tarjeta Electrónica de Control de Válvulas de Distribución 4/2 vías**

	Válvula-Cambio Ensayo		Válvula-Protección	
	Vin1='0'	Vin1='1'	Vin1='0'	Vin1='1'
Vin(V)	0	4.856	0	4.856
V4n25(V)	0	1.183	0	1.184
Vgs(V)	0	4.307	0	4.300
Vds(V)	23.980	0.052	23.980	0.067
Vcarga(V)	0	23.820	0	23.72
ID (A)	0	0.972	0	0.965

*Fuente: Elaboración Propia*

Según los valores obtenidos del ensayo, se muestra en la tabla 4.2.6 que para un  $V_{GS}$  de 4.307 V, el  $I_D$  experimental fue 0.972 A. Además, según el diseño se tiene que el  $I_D$  máximo es 3 A para un  $V_{GS}$  de 4.5 V en zona óhmica, por lo que cumple con el

requerimiento de 1.29 A que necesita la carga real. Entonces, se comprueba cumplen con los requerimientos de control secundario de cargas.

#### 4.2.4 Ensayos de la etapa de procesamiento

Esta etapa de pruebas individuales requiere utilizar los valores adquiridos de la etapa de control y realizar gráficas que permitan al usuario un mejor estudio e interpretación de los datos. Por ello, se procedió a hacer la adquisición de las variables de interés, obtención las gráficas y tablas deseadas utilizando la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB.

##### 4.2.4.1 Procesamiento de la Distancia

Para realizar este ensayo individual se utilizó la cámara web seleccionada y una computadora personal (PC) donde se ejecutó la interfaz gráfica desarrollada como se observa en el diagrama de bloque de la figura 4.2.20.



**Figura 4.2.20 Diagrama de Bloque para el procesamiento de distancia**

*Fuente: Elaboración Propia*

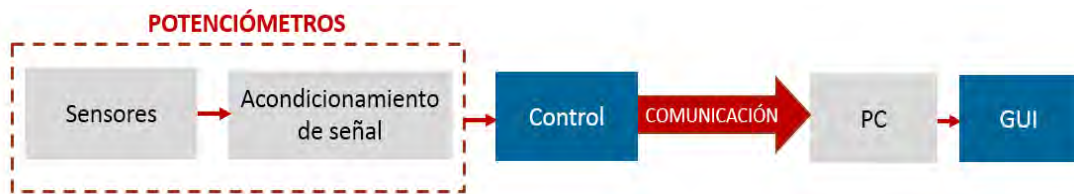
Para procesar la distancia en base al cambio de posición del centroide se ejecutó la interfaz gráfica de usuario desarrollada, luego se seleccionó el tipo de ensayo e inició el ensayo.

Seguidamente, se colocó un plumón color rojo frente al lente de la cámara, el cual se desplazó de arriba hacia abajo y con ayuda de la cámara se capturó imágenes sucesivas de 640 x 480 píxeles. Estas imágenes fueron procesadas por la computadora personal (PC), se determinó el centroide del área roja y se calculó el desplazamiento según el cambio de posición del nuevo centro con respecto al punto inicial u origen, este valor se convierte de pixel a mm por un factor de: 0.31373 mm/pixel, el cual fue calculado previamente.

##### 4.2.4.2 Procesamiento de la Presión

Para el desarrollo de esta prueba individual fue necesario: una tarjeta de desarrollo Arduino 2560 (controlador), un cable USB 2.0 tipo A/B (comunicación serial), una computadora personal (PC) donde se ejecutó la interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada, y dos potenciómetros conectado a 5 V que simularán las entradas

analógicas de los transmisores de presión de 0 a 60 bar y de 0 a 600 bar (ver figura 4.2.21).



**Figura 4.2.21 Diagrama de Bloque para el procesamiento de distancia**

*Fuente: Elaboración propia*

Entonces, para procesar la señal de presión del sistema se ejecutó la interfaz gráfica de usuario desarrollada (GUI), luego se seleccionó el tipo de ensayo e inició el ensayo. Como resultado, el Arduino leyó las señales de baja presión y de alta presión, para determinar la presión del sistema realizó el siguiente análisis: si la lectura de presión es menor a 60 bares se considera la lectura del sensor de baja presión y se omite la lectura del sensor de alta presión (0-600 bar); mientras que si la lectura del valor de presión mayor a 60 bares se considera la lectura del sensor de alta presión y se omite la lectura del sensor de baja presión.

Este valor de presión del sistema es enviado por el controlador a través del cable USB 2.0 tipo A/B a la computadora personal (PC), y dichos valores son representados en una gráfica con ayuda de la interfaz gráfica de usuario.

#### **4.2.4.3 Cálculo de tiempos de procesamiento**

Para que se cumpla el requerimiento de 2 muestras/s, se debe asegurar que los tiempos involucrados durante el procesamiento de las señales de presión y desplazamiento, sean muy pequeños, de tal manera se asegure que el tiempo de muestreo sea aproximadamente 500 ms.

Durante el desarrollo de los ensayos de compresión y tracción con carga y sin carga (vacío) se monitoreó los tiempos de procesamiento de las variables de presión y desplazamiento. A continuación, en las tablas 4.2.6 y 4.2.7 se presentarán los tiempos máximo de procesamiento de variables, para mayor detalle revisar los ANEXO 21 y ANEXO 22.

**Tabla 4.2.9 Tiempo Máximo de Procesamiento de Variables de Presión y Desplazamiento durante Ensayos sin Carga**

Ensayos de Compresión (C) y Tracción (T)	N° Muestras	Tiempo Escaneo Foto Máximo (ms)	Tiempo Procesamiento Foto Máximo (ms)	Tiempo Impresión Foto Máximo (ms)	Tiempo Impresión Centro Máximo (ms)	Tiempo Procesamiento Desplazamiento Máximo (ms)	Tiempo Procesamiento presión Máximo (ms)
C001V	27	0.260	1.034	1.049	1.054	3.397	0.985
C002V	37	0.289	0.684	0.696	0.702	2.371	0.633
C003V	32	0.277	1.082	1.100	1.109	3.568	1.035
C004V	26	0.251	1.073	1.080	1.084	3.488	1.031
C005V	23	0.246	0.923	0.929	0.931	3.029	0.897
C006V	30	0.275	1.136	1.141	1.143	3.694	1.121
C007V	29	0.255	<b>1.276</b>	<b>1.285</b>	<b>1.289</b>	<b>4.106</b>	<b>1.236</b>
C008V	27	<b>0.296</b>	1.056	1.066	1.071	3.488	1.010
T001V	29	0.271	1.007	1.019	1.024	3.322	0.949
T002V	23	0.293	0.971	0.987	0.995	3.246	0.920
T003V	27	0.284	1.078	1.097	1.104	3.563	1.018
T004V	32	0.250	0.406	0.416	0.419	1.490	0.354
T005V	31	0.272	1.103	1.112	1.116	3.602	1.053
T006V	33	0.260	1.033	1.040	1.043	3.376	0.981
T007V	32	0.280	1.156	1.162	1.165	3.762	1.119
T008V	33	0.253	1.192	1.199	1.203	3.848	1.159
<b>Tiempo Máximo (ms)</b>		0.296	1.276	1.285	1.289	4.106	1.236

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 4.2.10 Tiempo Máximo de Procesamiento de Variables de Presión y Desplazamiento durante Ensayos con Carga**

Ensayos de Compresión (C) y Tracción (T)	N° Muestras	Tiempo Escaneo Foto Máximo (ms)	Tiempo Procesamiento Foto Máximo (ms)	Tiempo Impresión Foto Máximo (ms)	Tiempo Impresión Centro Máximo (ms)	Tiempo Procesamiento Imagen Máximo (ms)	Tiempo Procesamiento presión Máximo (ms)
C001C	29	<b>0.502</b>	<b>1.594</b>	0.749	<b>1.420</b>	<b>4.265</b>	0.656
C002C	32	0.238	0.389	0.397	0.401	1.425	0.356
C003C	29	0.280	1.048	1.061	1.066	3.456	0.994
C004C	22	0.233	1.197	1.201	1.203	3.834	1.180
C005C	25	0.224	1.198	1.202	1.204	3.829	<b>1.182</b>
C006C	19	0.263	1.133	1.141	1.145	3.681	1.093
T001C	25	0.273	1.228	<b>1.235</b>	1.238	3.974	1.177
T002C	29	0.242	0.761	0.768	0.771	2.542	0.729
T003C	48	0.262	0.434	0.439	0.441	1.575	0.402
T004C	39	0.232	0.989	0.994	0.996	3.211	0.972
T005C	25	0.359	0.389	0.402	0.409	1.559	0.361
T006C	23	0.255	1.133	1.142	1.146	3.675	1.094
<b>Tiempo Máximo (ms)</b>		0.502	1.594	1.235	1.420	4.265	1.182

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.2.6 se observa que los tiempos máximos de procesamiento de desplazamiento y presión en un ensayo sin carga fueron  $t_1=4.106$  ms y  $t_2=1.236$  ms respectivamente. Mientras, en la tabla 4.2.7 los tiempos máximos de procesamiento de desplazamiento y presión registrados durante ensayos de compresión y tracción con carga fueron:  $t_3=4.265$  ms y  $t_4= 1.182$  ms respectivamente.

$$Si t_m = 500 ms, entonces: t_m \approx 121 * t_1 \approx 404 * t_2 \approx 117 * t_3 \approx 423 * t_4$$

Entonces, si los valores de los tiempos de procesamiento máximos ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$ ) son mucho menores al tiempo de muestro del sistema ( $t_m$ ), se deduce que los tiempos de procesamiento de las variables desplazamiento y presión generan un retraso mínimo y despreciable en el monitoreo de variables asistido por la interfaz gráfica de usuario, durante el desarrollo de ensayos de compresión y tracción.

#### 4.2.5 Ensayos de materiales con el sistema de monitoreo de MUE


Para validar el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo de la máquina universal de ensayos, se han desarrollado ensayos de compresión y tracción en el Laboratorio de Diseño Mecánico de la PUCP.

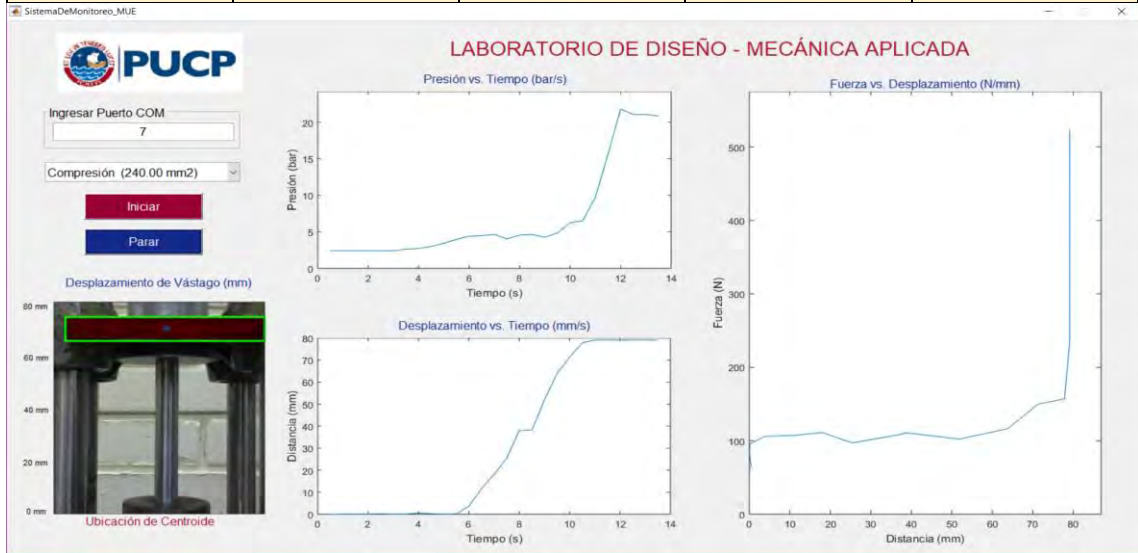
A continuación, en la tabla 4.2.8 se presenta los resultados de los 8 ensayos de compresión y tracción sin carga, y en las figuras 4.2.22 y 4.2.23 se presentan el detalle de los ensayos compresión sin carga (C001V) y ensayos de tracción sin carga (T001V), para mayor detalle de los demás ensayos revisar el ANEXO 23.

Tabla 4.2.11 Pruebas en Vacío: Ensayos de Compresión y Tracción

N° Ensayo	Tipo de Ensayo	N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)
C001V	Compresión	25	21.08	505.92	79.14	12.5
C002V	Compresión	32	32.09	770.16	79.21	16.0
C003V	Compresión	23	16.82	403.68	79.27	11.5
C004V	Compresión	23	30.26	726.24	79.77	11.5
C005V	Compresión	21	37.82	907.68	79.61	10.5
C006V	Compresión	26	37.01	888.24	79.67	13.0
C007V	Compresión	26	44.87	1,076.88	79.19	13.0
C008V	Compresión	24	30.55	733.2	79.58	12.0
T001V	Tracción	20	9.62	138.4	79.18	10.0
T002V	Tracción	19	14.25	205.01	79.21	9.5
T003V	Tracción	21	9.55	137.4	79.26	10.5
T004V	Tracción	29	39.36	566.27	79.63	14.5
T005V	Tracción	27	33.93	488.15	78.99	13.5
T006V	Tracción	25	13.29	191.2	78.90	12.5
T007V	Tracción	26	9.33	134.23	78.71	13.0
T008V	Tracción	28	33.19	477.5	78.92	14.0


*Fuente: Elaboración propia*

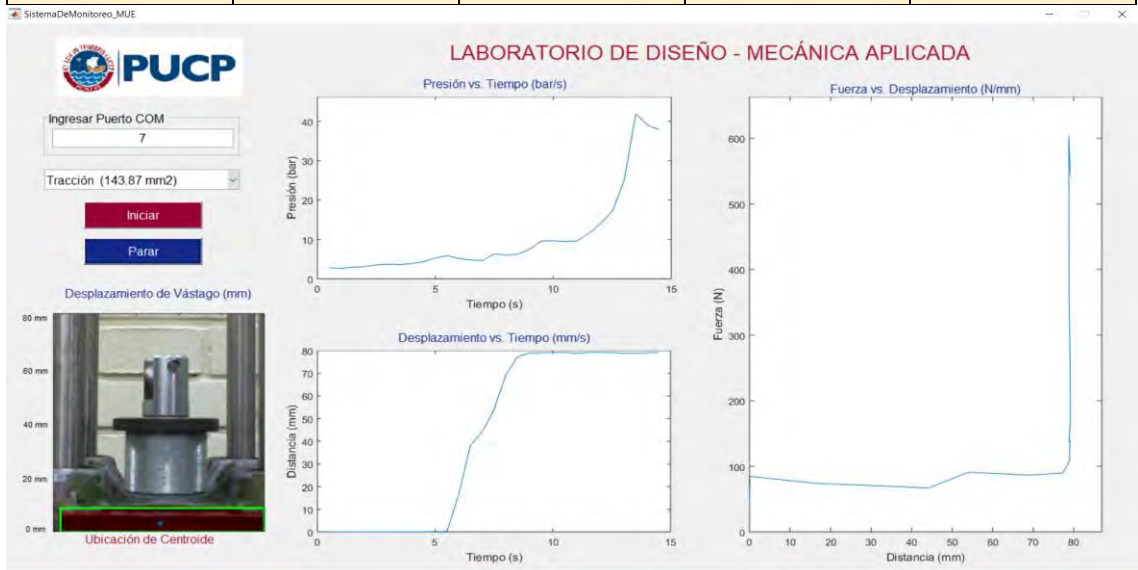
Tipo de Ensayo	Compresión (C001V)		Monitoreo (Excel)	 C001V_Ensayo_Pande o 1_Compresion_07-1
Carga	Vacío			
N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)
25	21.08	505.92	79.14	12.5



**Figura 4.2.22 Pruebas sin Carga: Ensayo de Compresión**

*Fuente: Elaboración Propia*

Tipo de Ensayo	Tracción (T001V)		Monitoreo (Excel)	 T001V_Ensayo_Pande o 1_Traccion_07-Sep
Carga	Vacío			
N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)
20	9.62	138.40	79.18	10.0



**Figura 4.2.23 Pruebas sin Carga: Ensayo de Tracción**

*Fuente: Elaboración Propia*

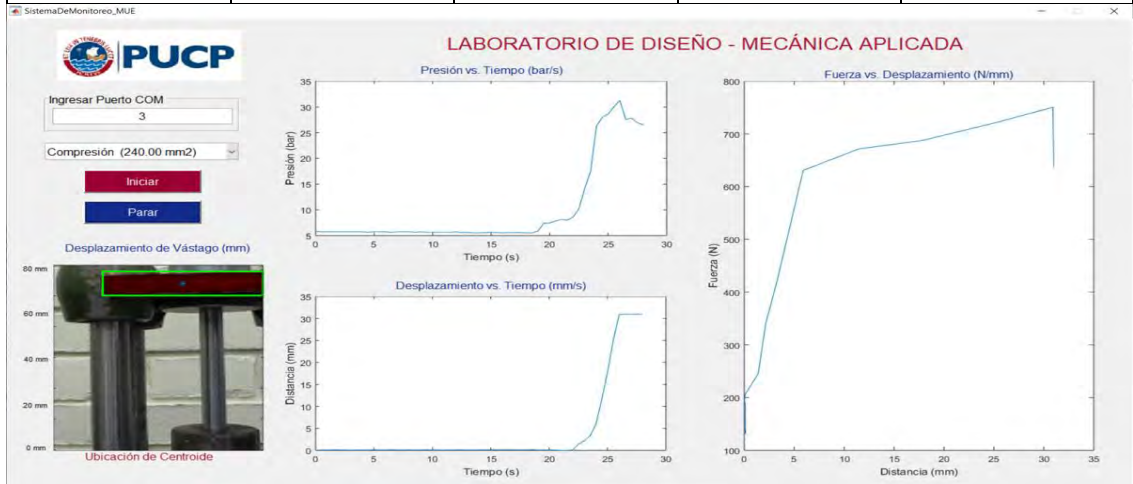
Además, en la tabla 4.2.12 se presenta los resultados de los 6 ensayos de compresión y tracción con carga desarrollados en el Laboratorio de Diseño de la PUCP, y en las figuras 4.2.24 y 4.2.25 se presentan el detalle de los ensayos compresión con carga (C001C) y ensayos de tracción con carga (T001C) respectivamente, para mayor detalle de los demás ensayos revisar el ANEXO 23.

**Tabla 4.2.12 Pruebas con Carga: Ensayos de Compresión y Tracción**

N° Ensayo	Tipo de Ensayo	N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)
C001C	Compresión	54	27.54	660.96	30.98	26.5
C002C	Compresión	30	24.75	594	50.73	14.5
C003C	Compresión	25	25.56	613.44	43.91	12.0
C004C	Compresión	19	28.86	692.64	18.58	9.0
C005C	Compresión	23	24.97	599.28	21.88	11.0
C006C	Compresión	15	28.42	682.08	22.94	7.0
T001C	Tracción	24	30.99	445.85	8.84	11.5
T002C	Tracción	27	149.82	2155.46	21.78	13.0
T003C	Tracción	44	186.54	2683.75	42.58	21.5
T004C	Tracción	38	161.57	2324.51	43.46	18.5
T005C	Tracción	32	175.52	2,525.21	22.75	15.5
T006C	Tracción	20	89.6	1289.08	12.58	9.5

*Fuente: Elaboración propia*

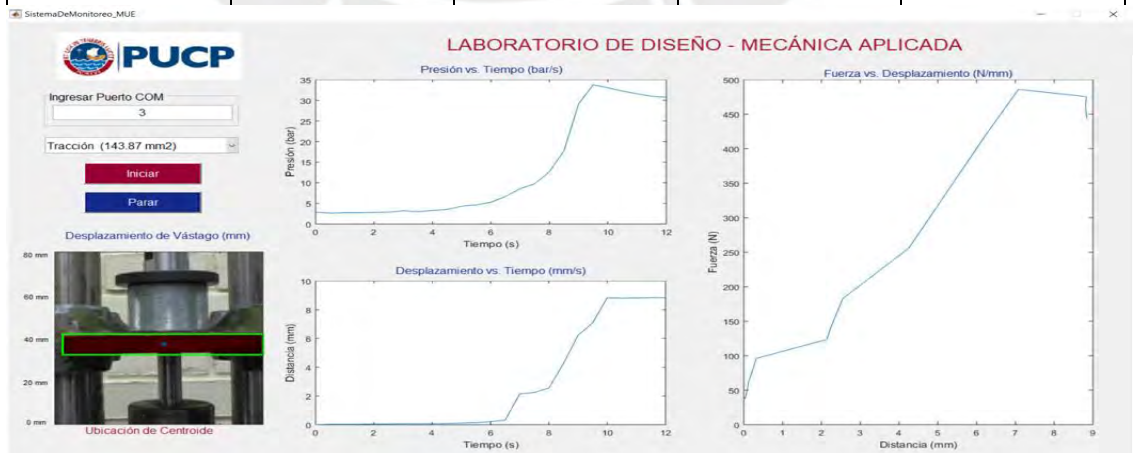
Tipo de Ensayo	Compresión (C001C)		Monitoreo (Excel)	C001C_Ensayo_Pande o 1_Compresion 07-S
Carga	Carga			
N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)
53	31.27	750.48	30.91	26.0
54	27.54	660.96	30.98	26.5
55	27.83	667.92	30.98	27.0



**Figura 4.2.24 Pruebas con Carga: Ensayos de Compresión**

*Fuente: Elaboración propia*

Tipo de Ensayo	Tracción (T001C)		Monitoreo (Excel)	T001C_Ensayo_Pande o 1_Traccion 07-Set-2
Carga	Carga			
N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)
23	31.58	454.34	8.82	11.0
24	30.99	445.85	8.84	11.5
25	30.77	442.69	8.84	12.0

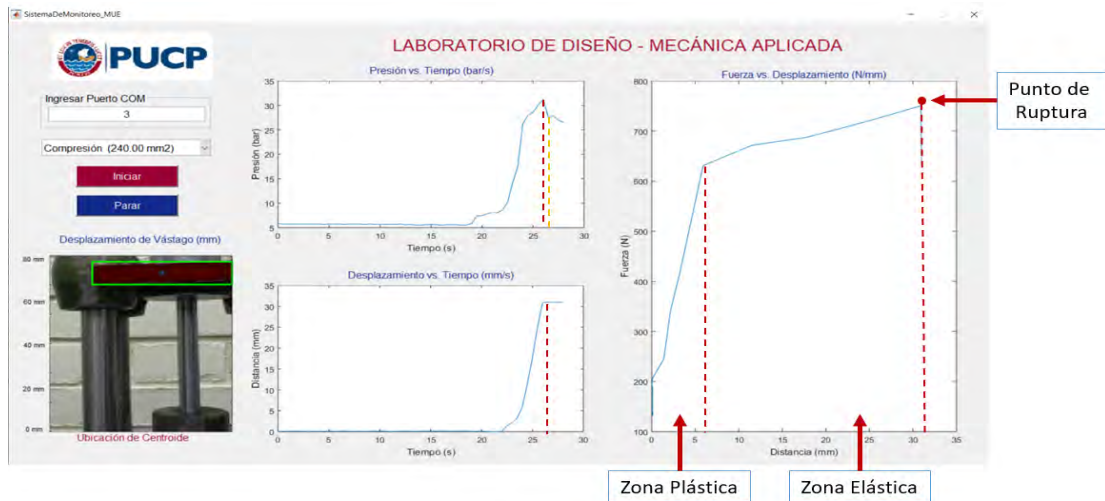


**Figura 4.2.25 Pruebas con Carga: Ensayos de Tracción**

*Fuente: Elaboración propia*



De los resultados obtenidos se puede observar el comportamiento de material:



N° Muestra	Presión (bar)	Fuerza (N)	Distancia (mm)	Tiempo Muestreo (s)	Observaciones
53	31.27	750.48	30.91	26.0	Máxima Oposición del material
54	27.54	660.96	30.98	26.5	Punto de ruptura

**Figura 4.2.26 Pruebas con Carga: Ensayos de Compresión**

*Fuente: Elaboración propia*

Cuando un material es sometido a un ensayo destructivo presenta dos tipos de comportamiento: plástico y elástico. Como se observa en la figura 4.2.26, en la zona plástica la probeta experimenta deformación que no es permanente [0 mm-5.9 mm]; es decir, si se detiene el ensayo hasta cierto punto se puede recuperar su longitud inicial. Mientras que en la zona elástica las deformaciones longitudinales son permanentes ] 5.9 mm; 30.98 mm] hasta llegar al punto de ruptura.

El punto de ruptura se analiza en dos instantes: cuando la fuerza del sistema es máxima, y el desplazamiento es máximo. En la figura 4.2.25, en  $t=26.0$  s la fuerza máxima que resiste la probeta a ser deformada es  $F= 750.48$  N, un instante después de vencerse esta barrera ( $t=26.5$  s), la fuerza cae a 660.96 N y presenta un desplazamiento máximo de  $D=30.98$  mm, debido a que el material llegó al punto de ruptura y se deformó permanentemente.

En síntesis, la finalidad de estos ensayos de materiales es monitorear en tiempo real la fuerza y el desplazamiento longitudinal que experimenta una carga (probeta) durante ensayos de compresión o tracción de inicio a fin. Este monitoreo facilita otras aplicaciones como el análisis cualitativo y cuantitativo del comportamiento elástico y plástico del material que escapa del alcance del presente trabajo de tesis.

### 4.3 Conclusiones

- Se logró diseñar e implementar un sistema electrónico de monitoreo en tiempo real para una máquina universal de ensayos, cuya tiempo de muestreo es 500 ms, lo que permite el análisis del comportamiento y características de materiales.
- Se obtuvo que los porcentajes de error relativo máximos obtenidos en los procesos de calibración de los transmisores de presión son: 0.499% para el transmisor de presión 0-60 bar y 1.710% para el transmisor de presión 0-600 bar entre el valor medido al valor patrón; en ambos casos el error es bastante aceptable.
- Se obtuvo que el error medio obtenido en el proceso de calibración de la cámara por software es de 0.73 pixeles o 0.237 mm aproximadamente, lo que equivale un 4.74% de 5 mm (resolución del sistema). Mientras que en el proceso de calibración de cámara usando el vernier como instrumento patrón se obtuvo en los ensayos de subida un error máximo de 0.37%, y en los ensayos de bajada se obtuvo un error máximo de 0.52% entre el valor medido al valor patrón, lo cual es bastante aceptable.
- Se logró desarrollar un software para el sistema de monitoreo para la adquisición de data de sensores de presión; además, se desarrolló un sistema de control secundario para controlar los 2 estados de las válvulas de distribución 4/2 vías que tienen como propósito: cambiar el sentido de flujo de aceite en el sistema, según el cambio de ensayo: tracción o compresión, y proteger al sensor de baja presión (0 a 60 bar) frente a presiones mayores en el sistema.
- Se logró desarrollar una interfaz gráfica de usuario que ofrece un entorno amigable al usuario y cumple con los requerimientos de monitoreo simultáneo de tres gráficas de interés: Presión vs. Tiempo, Distancia vs Tiempo y Fuerza vs Distancia, lo cual permite analizar el comportamiento de materiales durante ensayos de compresión y tracción.
- Se logró implementar un sistema de seguridad mecánico para proteger los accesorios del sistema de medición de presiones mayores de 350 bares, el cual ha sido diseñado e implementado por ingenieros mecánicos de la PUCP.
- Como producto final del presente trabajo de tesis, se implementó un módulo educativo automático para complementar el desarrollo de los ensayos de compresión y tracción de materiales en el laboratorio de Diseño Mecánico de la PUCP. El cual redujo drásticamente errores medición por causas humanas, asegura mayor precisión en la medición de variables usando sensores, y provee un registro de variables que permite realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de materiales.

## RECOMENDACIONES

- Además, para la obtención de un producto final como módulo educativo, se debe desarrollar un panel de control fabricado con un material resistente como el policarbonato o aluminio metálico para el alojamiento del sistema de control electrónico.
- Si se quiere reducir el hardware para cumplir con el requerimiento de resolución mínima de 0.5 bar, entonces esto es posible sólo utilizando el sensor de 0-600bar con un controlador, cuyo ADC sea mayor a 10 bits.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Du Jingqing and Gao Shiqiao and Niu Shaohua  
2010 "New Idea for Hydraulic Testing Machine with Stress and Strain Rates Controlled and its Realization". Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on,2010, volumen,2,pp. 768-772
- [2] Siddiqui, R.A , R.I. Grosvenor and P.W  
2015 PIC-based advanced data acquisition system for Monitoring, Control and Security Applications, 2015 Islamabad conference. pp.293-298
- [3] NATIONAL INSTRUMENTS  
Adquisición de datos. Consultado 17 de octubre del 2015  
<http://www.ni.com/data-acquisition/esa/>
- [4] PROAKIS, John y Dimitris MANOLAKIS  
2007 Tratamiento Digital de Señales  
pp. 5-33
- [5] FMCG Reports  
Universal Testing Machine Market Is Booming Worldwide, Steven Jefferson  
Consultado: 09 de octubre del 2019  
<http://fmcgreports.us/1825/universal-testing-machine-market-is-booming-worldwide-leading-key-players-mts-instron-zwick-roell/>
- [6] DIGITAL JOURNAL  
China Testing Machine Industry Report 2016- Size, Growth Analysis Forecast.  
Consultado:19 de setiembre del 2015  
<http://www.digitaljournal.com/pr/2718526>

- [7] SHANGHAI BAIROE TEST INSTRUMENT CO., LTD.  
Máquina de prueba de cansancio automática. Consultado: 8 de setiembre del 2015  
<http://spanish.bairoe.cn/quality-1822169-computerized-fatigue-testing-machine>
- [8] PROETI S.A  
Catálogo de Máquinas de ensayos universales electro-mecánicas, 5 - 300 kN. Consultado: 9 de setiembre del 2015  
<http://proetisa.com/proetisa-producto.php?id=1&prod=676>
- [9] ALIBABA.COM  
LDW-100 Digital Display Electronic Fabric Tensile Strength Tester. Consultado: 8 de setiembre del 2015  
[http://precisiontestingequip.en.alibaba.com/product/504926120-214302352/LDW\\_100\\_Digital\\_Display\\_Electronic\\_Fabric\\_Tensile\\_Strength\\_Tester.html](http://precisiontestingequip.en.alibaba.com/product/504926120-214302352/LDW_100_Digital_Display_Electronic_Fabric_Tensile_Strength_Tester.html)
- [10] He Ling; Xu Cheng; Wang Yaping; Wang Yongjuan  
2009 An impact fatigue testing machine to investigate the fatigue lifetime of automatic mechanism key components. Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IE&EM '09. 16th International Conference on , vol., no., pp.1555-1559, 21-23
- [11] DÍEZ DE LA CORTINA LEÓN, Antonio.  
2009 Manual de oleo hidráulica, Primera edición. Alfaomega Grupo Editor Copyright S.L, pp. 1-28
- [12] RESISTENCIA DE MATERIALES  
Esfuerzos. Consultado: 8 de setiembre del 2015  
<https://ibiguridp3.wordpress.com/res/esf/>

- [13] ASTM INTERNATIONAL  
ASTM Designation: A 370 – 77. Standard Methods and definition for MECHANICAL TESTING OF STEEL PRODUCTS.  
Consultado: 24 octubre del 2015  
<https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/astm.a370.1977.pdf>
- [14] JIQIANG Han and QIANG Gao  
2012 “Research on downhole multi-parameters monitoring system “. Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International . Ciudad, año, volumen,4, pp. Página 2765-2768
- [15] Schmalzel, J.L. and Rauth, D.A  
2005 “Sensors and signal conditioning”. Instrumentation Measurement Magazine, IEEE. Ciudad, 2005, volumen, 8, pp. 48-53
- [16] ARDUINO  
Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560.  
Consultado: 24 de setiembre del 2015  
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [17] TOMASI, Wayne  
2003 Sistema de comunicaciones electrónicas  
pp. 605-606
- [18] MECMESIN  
Células De Carga Especializadas  
Consultado: 15 octubre del 2015  
<http://www.mecmesin.es/celulas-de-carga-especializadas>
- [19] SENSING  
Célula De Carga Tipo “Donut” Aep C10.  
Consultado: 15 octubre del 2015  
[http://www.sensores-de-medida.es/uploads/aep\\_c10.pdf](http://www.sensores-de-medida.es/uploads/aep_c10.pdf)

- [20] DANFOSS  
Brochure: Transmitter overview for wholesaler  
Consultado: 14 octubre del 2018  
<https://assets.danfoss.com/documents/DOC244586497021/DOC244586497021.pdf>
- [21] ZALAPA, Omar Rodríguez; ZAVALA, Antonio Hernández;  
HUERTAS RUELAS, Jorge Adalberto  
Sistema de medición de distancia mediante imágenes para determinar la posición de una esfera utilizando el sensor Kinect XBOX.  
Consultado 17 de octubre del 2015  
[https://www.researchgate.net/publication/279231422\\_Sistema\\_de\\_medicion\\_de\\_distancia\\_mediante\\_imagenes\\_para\\_determinar\\_la\\_posicion\\_de\\_una\\_esfera\\_utilizando\\_el\\_sensor\\_Kinect\\_XBOX](https://www.researchgate.net/publication/279231422_Sistema_de_medicion_de_distancia_mediante_imagenes_para_determinar_la_posicion_de_una_esfera_utilizando_el_sensor_Kinect_XBOX)
- [22] LOGITECH  
LOGITECH webcam-c310. Consultado 18 octubre del 2015  
<http://www.logitech.com/es-es/product/hd-webcam-c310>
- [23] MACRO SENSORS  
LVDT basics. Consultado: 20 octubre del 2015  
<http://www.macrosensors.com/downloads/misc/LVDT-Basics.pdf>
- [24] TODO INGENIERIA INDUSTRIAL  
Tipos De Errores: Definición, Impacto En La Medición, Clasificación, Causas De Los Errores, Consecuencias En La Medición, Estudios De R Y Ri.  
Consultado: 05 de octubre del 2015  
<https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/metrologia-y-normalizacion/2-7-tipos-de-errores/>
- [25] Tjiu, W. , A. Ahanchian and Majlis, B.Y.  
2004 Development of tire condition monitoring system (TCMS) based on MEMS sensors. Semiconductor Electronics, 2004. ICSE 2004. IEEE International Conference on ,pp. 4

- [26] INPROCESS  
Transmisor de presión para trabajos severos MBS 3050  
Consultado: 28 Setiembre 2015  
<http://www.inprocess.com.pe/datasheets/presion/transmisores/MBS%203050.pdf>
- [27] DANFOSS  
Hoja de datos de Transmisor de presión MBS 3000  
Consultado: 21 de Julio 2016  
<http://www.elhinel.com.ar/danfoss/lit/PDP20K205.pdf>
- [28] WIKA  
General Purpose Pressure Transmitter.  
Consultado: 15 de junio del 2016  
[http://www.wikagauges.com/WIKA-S10-Pressure-Transmitter-0--1000-psi---12-npt\\_p\\_312.html](http://www.wikagauges.com/WIKA-S10-Pressure-Transmitter-0--1000-psi---12-npt_p_312.html)
- [29] HBM  
SENSORES: Transductores tipo C2  
Consultado: 15 de junio del 2016  
<https://www.hbm.com/es/2420/c2-serie-tipo-transductores-de-fuerza-para-medicion-de-fuerzas/>
- [30] DANFOSS  
Catalogo productos. Consultado 22 de setiembre  
[http://www.danfoss.com/Latin\\_America\\_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products/Detail/IA/Pressure-transmitters/MBS-3000-Compact-pressure-transmitters/060G1110/40b216af-7043-49f7-a609-d48e0d8fa40c/cda9e39b-e293-4dec-9117-0d9101b3f846.html](http://www.danfoss.com/Latin_America_spanish/BusinessAreas/IndustrialControls/Products/Detail/IA/Pressure-transmitters/MBS-3000-Compact-pressure-transmitters/060G1110/40b216af-7043-49f7-a609-d48e0d8fa40c/cda9e39b-e293-4dec-9117-0d9101b3f846.html)
- [31] LOGITECH  
HD webcam-c525 .Consultado: 22 de Julio del 2016  
<http://www.logitech.com/es-roam/product/hd-webcam-c525>



- [32] NAYLAMP MECHATRONICS  
Sensor Ultrasonido HC-SR04  
Consultado: 03 setiembre del 2019  
<https://naylampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>
- [33] HR-T SERIES  
General Purpose, High Temperature LVDT  
Consultado: 03 setiembre del 2019  
[https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=HR-T\\_Series&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&PartCntxt=CA-T-LVDT0052](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=HR-T_Series&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&PartCntxt=CA-T-LVDT0052)
- [34] SMAR EQUIPAMENTOS INDUSTRIALES LTDA  
Redes Industriales. Consultado: 15 marzo del 2016  
<http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/redes-industriales-parte-1>
- [35] SEDRA/SMITH  
1999 "Circuito Microelectrónicos". CAPITULO 5: Transistores de efecto de campo (FET), 1999, volumen pp. 364-376
- [36] Paruro.pe  
Tarjeta de desarrollo PIC18FJS1.  
Consultado: 20 de marzo del 2016  
<http://paruro.pe/productos/tarjetas-de-desarrollo/tarjetas-de-microcontroladores/tarjeta-de-desarrollo-pic18fjs1>
- [37] Paruro.pe  
Tarjeta de desarrollo ARDUINO 2560.  
Consultado: 20 de marzo del 2016  
<http://paruro.pe/productos/ofertas/oferta-arduino-paquete-2>
- [38] ARDUINO  
USB 2.0 cable type A/B. Consultado: 28 de marzo del 2016  
<https://store.arduino.cc/product/M000006>

- [39] AMAZON  
Switch Power Supply. Consultado: 20 julio del 2016  
[https://www.amazon.com/Aiposen-Transformer-Security-Computer-Project/dp/B01B1PRE7E/ref=sr\\_1\\_6?ie=UTF8&qid=1479680037&sr=8-6&keywords=switching+supply++24v+5A](https://www.amazon.com/Aiposen-Transformer-Security-Computer-Project/dp/B01B1PRE7E/ref=sr_1_6?ie=UTF8&qid=1479680037&sr=8-6&keywords=switching+supply++24v+5A)
- [40] MATHWORKS  
MATLAB– Crea una aplicación sencilla usando GUIDE  
Consultado: 03 setiembre del 2019  
[https://la.mathworks.com/help/matlab/creating\\_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html?searchHighlight=guide&sr\\_tid=doc\\_srchtile](https://la.mathworks.com/help/matlab/creating_guis/about-the-simple-guide-gui-example.html?searchHighlight=guide&sr_tid=doc_srchtile)
- [41] NATIONAL INSTRUMENT  
Interfaz de Desarrollo Intuitiva. Consultado: 01 abril del 2016  
<http://www.ni.com/labview/why/user-interface/esa/>
- [42] ARDUINO  
Download the Arduino Software. Consultado: 22 de marzo del 2016  
<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [43] MATHWORKS  
MATLAB– documentation: camera Calibration  
Consultado: 01 abril del 2016  
<http://www.mathworks.com/help/vision/camera-calibration.html>

## ANEXOS

- ANEXO 1: Hoja técnica de datos del integrado: 4N25
- ANEXO 2: Hoja técnica de datos del integrado: IRF540
- ANEXO 3: Hoja técnica de datos del componente: Segment Four Digit Led Display
- ANEXO 4: Hoja técnica de datos del integrado: 74LS47
- ANEXO 5: Hoja técnica de Transmisor de Presión MBS3050 (0-600 bar)
- ANEXO 6: Hoja técnica de Transmisor de Presión MBS3000 (0-60 bar)
- ANEXO 7: Hoja técnica de Válvula de Distribución 4/2
- ANEXO 8: Hoja técnica de Válvula Limitadora de Presión
- ANEXO 9: Planos del circuito hidráulico del bloque de conexiones hidráulico
- ANEXO 10: Diseño del bloque de conexiones oleo-hidráulico
- ANEXO 11: MODELO 3D del bloque de conexiones hidráulico
- ANEXO 12: MODELO 3D del montaje del bloque de conexiones hidráulico
- ANEXO 13: Código fuente del Programa sistema de monitoreo (ARDUINO)
- ANEXO 14: Código fuente del Programa Interfaz Gráfica (MATLAB)
- ANEXO 15: Código fuente del Programa de 'Single Camera Calibration' (MATLAB)
- ANEXO 16: Presencia en el Mercado: Tablas de Especificaciones Técnicas Máquinas Universales de Ensayos
- ANEXO 17: Diseño de PCB del Circuito Visualizador de Sistema de Monitoreo MUE
- ANEXO 18: Diseño de PCB del Circuito Electrónico de Control Secundario de Sistema de Monitoreo MUE
- ANEXO 19: Diagramas de Flujo del Sistema de Monitoreo MUE
- ANEXO 20: Calibración De Sensores De Presión
- ANEXO 21: Tiempo Procesamiento – Ensayos en Vacío
- ANEXO 22: Tiempo Procesamiento – Ensayos con Carga
- ANEXO 23: Resultado de Ensayos de Compresión y Tracción - Carga y Vacío
- ANEXO 24: Manual de Operación del Sistema De Monitoreo MUE