

**SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y MONITOREO, DEL PROCESO DE  
COMPRESIÓN UNIAXIAL SOBRE PLA PARA LA MUE TORCOPREN'S**



**Presentado por:**

**MANUEL ALEJANDRO HURTADO TOBAR**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS NATURALES**

**PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Popayán, agosto de 2022**

**SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y MONITOREO, DEL PROCESO DE  
COMPRESIÓN UNIAXIAL SOBRE PLA PARA LA MUE TORCOPREN'S**



**MANUEL ALEJANDRO HURTADO TOBAR**

**Trabajo de Grado**

**Director**

**M.Sc. JUAN PABLO DIAGO RODRÍGUEZ**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS NATURALES**

**PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Popayán, agosto de 2022**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

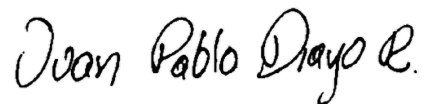
---

---



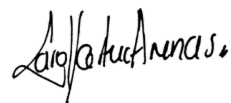
---

Firma del Estudiante



---

Firma presidente del Jurado



---

Firma del Jurado



---

Firma del Jurado

Popayán 1 de diciembre de 2022



## **DEDICATORIA**

Esta monografía está dedicada a Dios perfecto, porque su voluntad es buena y agradable, es quien guía todas mis acciones, conoce mis sueños y deseos, los que llegarán en su tiempo con optimismo.

Del mismo modo, dedico este trabajo, a mis padres Víctor Manuel y Alicia quienes representan el eje de mi vida, generadores de amor, formadores de mis principios, valores y promotores de mis metas, y a mi querida hermana María Victoria quién es mi referente y amiga confiable.

## **AGRADECIMIENTOS**

Un especial agradecimiento a mis padres generadores de sueños, y a todos los profesores de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, por su aporte y transferencia del conocimiento en el campo de la Ingeniería Electrónica.

Así mismo, a mi familia, que, de forma incondicional, me han brindado fortaleza y ánimo en este proceso.

Título	Sistema de supervisión y monitoreo del proceso de compresión uniaxial sobre PLA para la MUE Torcopren's.
Modalidad	Trabajo de investigación.
Facultad	Ingenierías y Ciencias Naturales.
Programa	Ingeniería Electrónica.
Tipo de Investigación	Investigación aplicada.
Director	M.Sc. Juan Pablo Diago Rodríguez.
Estudiante	Manuel Alejandro Hurtado Tobar.

## Índice de contenido

<b>Nota de Aceptación .....</b>	<b>3</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>12</b>
<b>1 CAPITULO: ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Planteamiento del Problema.....	13
1.2 Justificación.....	14
1.2.1 Teórica .....	14
1.2.2 Práctica .....	14
1.2.3 Metodológica .....	14
1.3 Objetivos .....	15
1.3.1 Objetivo general .....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.5 Enfoque metodológico.....	15
1.6 Estado del arte .....	19
1.7 Marco Teórico.....	23
1.7.1 Máquina de ensayos universal (MUE) .....	23
1.7.2 Prueba de compresión.....	26
1.7.3 Ácido poliláctico (PLA).....	29
1.7.4 Sistemas de supervisión y monitoreo .....	31
1.7.5 Normas aplicadas.....	31
<b>2 CAPÍTULO: PROCESO DE COMPRESIÓN UNIAxIAL SOBRE PLA EN LA MUE TORCOPREN'S .....</b>	<b>34</b>
2.1 Descripción del proyecto de supervisión y monitoreo .....	34
2.2 Modelado ISA S88 del proceso de compresión Torcopren's.....	38
2.3 Diagnóstico físico de la MUE Torcopren's .....	41
2.3.1 MUE composición estructural .....	42
2.3.2 Actualización de componentes para la MUE Torcopren's .....	44
2.4 Instrumentación clave del proyecto.....	46
2.4.1 Variador de frecuencia.....	46
2.4.2 Motorreductor .....	48
2.4.3 Celda de carga .....	51
2.4.4 Finales de carrera.....	53
2.4.5 Encoder .....	54
2.4.6 Probetas de PLA .....	55
2.4.7 Cable de programación PLC-PC.....	57
2.4.8 Cable de comunicación RS-485 PLC-PC.....	57
2.4.9 PLC DVP02LC.....	57
2.4.10 Módulo de expansión DVP-06XA de entradas y salidas analógicas .....	58
2.5 MUE Torcopren's instrumentado versión original.....	62
<b>3 CAPITULO: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO .....</b>	<b>63</b>
3.1 Diseño del sistema SCADA .....	63
3.1.1 Arquitectura de automatización propuesta.....	63



3.1.2	Caracterización de sensores .....	65
3.2	Unidad de control por PLC de la maquina Torcopren's .....	69
3.2.1	Controlador lógico programable PLC .....	69
3.2.2	Características del PLC .....	70
3.2.3	Secuencia de operaciones del proceso de compresión .....	71
3.2.4	Programación del PLC.....	72
3.3	Diseño de la interfaz de supervisión y monitoreo .....	85
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO: PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>91</b>
4.1	Descripción de las pruebas realizadas.....	91
4.2	Ensayos de compresión.....	93
4.3	Análisis de resultados.....	96
4.3.1	Promedio .....	96
4.3.2	Distribución.....	97
4.3.3	Desviación estándar .....	98
4.3.4	Error cuadrático medio .....	98
<b>5</b>	<b>CAPITULO: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>98</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>108</b>
	Anexo A Programación Ladder de la maquina Torcopren's.....	108
	Anexo B Programación del Sistema de Supervisión y Monitoreo .....	117
	Anexo C Graficas Esfuerzo/Deformación ensayos del 3 al 10.....	136

## Índice de figuras

<i>Figura 1. Máquina de Ensayos Universal-25 [24].</i> .....	24
<i>Figura 2. Esquema de funcionamiento de la MUE durante prueba de tracción con probeta [30].</i> .....	24
<i>Figura 3. Máquina universal de ensayos Hidráulica [14] .....</i>	25
<i>Figura 4. Máquina universal de ensayos mecánica [4].</i> .....	25
<i>Figura 5. Máquina universal de ensayos mono espacio [30].</i> .....	26
<i>Figura 6. Máquina universal de ensayos doble espacio [30].</i> .....	26
<i>Figura 7. Prueba de a). compresión y, b). diagrama de deformación [24], [33].</i> ....	27
<i>Figura 8. Diagrama de esfuerzo-deformación unitario [37].</i> .....	28
<i>Figura 9. Diagrama de probeta norma ASTM-638 [25].</i> .....	30
<i>Figura 10. Modelo de estructura de la automatización de procesos.</i> .....	35
<i>Figura 11. Actuador de deformación original (no útil).</i> .....	37
<i>Figura 12. Motor con caja reductora TechTop instalado.</i> .....	38
<i>Figura 13. Funciones del variador [52] .....</i>	47
<i>Figura 14a. Botones de mando del variador de frecuencia [51].</i> .....	48
<i>Figura 14b. Instalación del variador de frecuencia sobre la planta física.</i> .....	48
<i>Figura 15. Diagrama de conexión eléctrica del variador de frecuencia [53].</i> .....	48
<i>Figura 16. Motorreductor.</i> .....	50
<i>Figura 17. Instalación.</i> .....	50
<i>Figura 18. Diagrama de conexión en el tablero del motorreductor [55].</i> .....	51

Figura 19. Celda de carga.....	51
Figura 20. Instalación.....	51
Figura 21. Diagrama de conexión eléctrico de la celda de carga[56].	52
Figura 22. Conexión del Módulo DVP02LC. [65].	52
Figura 23. Final de carrera [57]	53
Figura 24. Instalación.....	53
Figura 25. Diagrama de conexión eléctrica del final de carrera [57].	53
Figura 26. Enconder.....	54
Figura 27. Instalación del encoder. ....	54
Figura 28. Diagrama de conexión eléctrica del encoder [58]	55
Figura 29. Conexión del encoder al módulo DVP-06XA.....	55
Figura 30. Impresora DREMEL. ....	56
Figura 31. Filamento PLA amarillo[61]	56
Figura 32. Tamaños probeta. ....	57
Figura 33. Geometría de enjambre probeta. ....	57
Figura 34. Cable conexión PLA.....	57
Figura 35. Adaptador USB.....	57
Figura 36. Contactos cable comunicación [64].	57
Figura 37. PLC DVP 02ILC Delta. ....	58
Figura 38. Módulo de expansión DVP-06XA Delta.....	62
Figura 39. MUE instrumentado original. ....	62
Figura 40. Panel de control MUE original.....	62
Figura 41. Nueva máquina Torcopren's instrumentada, a la izquierda una vista general, a la derecha la vista desde el panel de control. ....	64
Figura 42. Arquitectura propuesta para el funcionamiento de la nueva máquina Torcopren's.....	65
Figura 43. Pesos estándar para la caracterización del sensor.....	66
Figura 44. Regresión lineal entre las variables fuerza/peso versus voltaje. ....	67
Figura 45. Medición con Pie de Rey del desplazamiento vertical del cabezal móvil. ....	68
Figura 46. PLC, Planta y PC [67].....	70
Figura 47. PLC DVP28SV DELTA.....	71
Figura 48. Diagrama de flujo del proceso de compresión.....	72
Figura 49. Configuración protocolo de comunicación Torcopren's.....	73
Figura 50. Controladores para protocolos del COMMGR.....	74
Figura 51. Ventana de creación del driver de comunicación Torcopren's.....	75
Figura 52. Creación del proyecto Torcopren's en ISPSOft. ....	76
Figura 53. Creación de un archivo Ladder. ....	76
Figura 54. Contactos comunes del lenguaje Ladder. ....	77
Figura 55. Etiquetas comunes del lenguaje Ladder. ....	78
Figura 56. Espacio de trabajo de programación Ladder en ISPSOft.....	78
Figura 57. Seudocódigo de funcionamiento de la maquina Torcopren's.....	81
Figura 58. Red 1 a red 4 del archivo Ladder Torcopren's. ....	81
Figura 59. Red 5 a red 7 del archivo Ladder Torcopren's. ....	82
Figura 60. Red 8 a red 11 del archivo Ladder Torcopren's. ....	82
Figura 61. Red 12 a red 14 del archivo Ladder Torcopren's. ....	83
Figura 62. Red 15 a red 18 del archivo Ladder Torcopren's. ....	83

<i>Figura 63. Red 19 a red 22 del archivo Ladder Torcopren's.</i>	84
<i>Figura 64. Red 23 a red 26 del archivo Ladder Torcopren's.</i>	84
<i>Figura 65. Red 27 a red 28 final del archivo Ladder Torcopren's.</i>	85
<i>Figura 66. Pantalla de inicio de la herramienta DiaView.</i>	86
<i>Figura 67. Interfaz de supervisión de la MUE Torcopren's.</i>	88
<i>Figura 68. Cuadro de configuración diccionario de variables.</i>	89
<i>Figura 69. Cuadro asociación de variables en "VariableGroup"</i>	90
<i>Figura 70. Ejemplo de un reporte generado por HMI de la MUE Torcopren's.</i>	90
<i>Figura 71. Gráficos de las variables posibles en el HMI de la MUE Torcopren's.</i>	91
<i>Figura 72. Probetas para ensayos.</i>	92
<i>Figura 73. Ensayo real de compresión sobre la MUE Torcopren's.</i>	92
<i>Figura 74. Curva ideal de compresión.</i>	93
<i>Figura 75. Curva de compresión ensayo 1.</i>	94
<i>Figura 76. Curva de compresión ensayo 2.</i>	95
<i>Figura 77. Curva de compresión ensayo 3.</i>	136
<i>Figura 78. Curva de compresión ensayo 4.</i>	137
<i>Figura 79. Curva de compresión ensayo 5.</i>	138
<i>Figura 80. Curva de compresión ensayo 6.</i>	139
<i>Figura 81. Curva de compresión ensayo 7.</i>	140
<i>Figura 82. Curva de compresión ensayo 8.</i>	141
<i>Figura 83. Curva de compresión ensayo 9.</i>	142
<i>Figura 84. Curva de compresión ensayo 10.</i>	143
<i>Figura 85. Diagrama de caja y bigotes.</i>	97

## Índice de tablas

<i>Tabla 1. Fases y actividades.</i>	16
<i>Tabla 2. Dimensiones de probeta para pruebas de tracción, norma ASTM-638 [25].</i>	30
<i>Tabla 3. Tabla de Normas aplicables, fuente propia.</i>	31
<i>Tabla 4. Modelo de proceso de acuerdo al estándar ISA88.</i>	39
<i>Tabla 5. Modelo físico de acuerdo al estándar ISA88.</i>	39
<i>Tabla 6. Modelo de control de procedimiento de acuerdo al estándar ISA88.</i>	41
<i>Tabla 7. Componentes estructurales.</i>	42
<i>Tabla 8. Componentes electromecánicos.</i>	42
<i>Tabla 9 requerimientos de componentes y equipos.</i>	44
<i>Tabla 10. Requerimientos de Software.</i>	45
<i>Tabla 11. Requerimientos de Hardware.</i>	46
<i>Tabla 12. Características PLC.</i>	57
<i>Tabla 13. Características módulo de entradas y salidas.</i>	59
<i>Tabla 14. Mediciones ajustadas del desplazamiento del cabezal movable en mm por vuelta y en grados del eje sinfín.</i>	69
<i>Tabla 15. Resumen del módulo de elasticidad en los ensayos.</i>	96

## RESUMEN

El trabajo de investigación, está basado en la metodología de investigación experimental-cuantitativa, y en sus diferentes capítulos presenta los aspectos detallados del proyecto, que nos permite identificar y comprender los lineamientos para abordar el desarrollo del proyecto, como el “Proceso de compresión uniaxial sobre PLA (Acido Poliláctico)” con el planeamiento y organización de las fases, actividades, los entregables y herramientas usadas en las actividades individuales, el diagnóstico e instrumentación para la puesta en marcha de la MUE Torcopren’s. Seguidamente, en detalle se describe el estudio del “Diseño y desarrollo del sistema de monitoreo” con el diseño del SCADA, su arquitectura de automatización y la programación de la unidad de control PLC.

Los Resultados describen los ensayos de compresión sobre probetas de material PLA, realizados a velocidad constante, obteniéndose información de la máquina como: la fuerza aplicada, el esfuerzo, la deformación, compresión con la elasticidad de deformación.

Se anota, que los datos obtenidos de la prueba con el software DIAView, son almacenados en un archivo Excel llamado “reportes” y se grafican utilizando la herramienta Matlab para estudiar su comportamiento por medio de un algoritmo de control.

Dentro de las “Conclusiones y Trabajos futuros”, se reafirma el cumplimiento del objeto de proyecto y la posibilidad de introducir nuevas mejoras con la inclusión de nuevas variables de programación en ISPSOFT, y mejoramiento del Supervisorio DIA View con la adición de botones para la ilustración, análisis e interpretación de los ensayos.

**Palabras clave:** Sistema, Supervisión, Monitoreo, Máquina, tensión uniaxial, Acido Poliláctico.

## INTRODUCCION

En diferentes sectores industriales y de investigación, se realizan procesos experimentales, tales como compresión, flexión y tracción, con el fin de medir la resistencia que oponen los materiales.

El siguiente trabajo de investigación explica el proceso de automatización de la máquina Torcopren’s de laboratorio de ingeniería industrial de la fundación universitaria de Popayán, con el objetivo de implementar un sistema de supervisión y monitoreo que permita la práctica de ensayos de tensión uniaxial sobre PLA.

Los sistemas de supervisión y monitoreo ofrecen la ventaja de optimizar procesos de producción, mediante el control de variables y dispositivos cuando sea necesario, ayudando a solucionar problemas y fallos en la planta.

Para la automatización de la máquina universal de ensayos Torcopren's se utiliza el PLC de la marca Delta DPV 28 SV, en el cual se implementa el lenguaje de programación Ladder en software ISPSOFT, para el control de proceso de tensión uniaxial, la interfaz gráfica de monitoreo se realiza en DIAView, que permite guardar datos y observar la evolución del sistema de control y en Matlab se realizan las gráficas del proceso de tensión uniaxial para el análisis de resultados.

## **1 CAPITULO: ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

Las prácticas experimentales con esfuerzos físicos, han ayudado al sector industrial y de investigación a estudiar la resistencia de los materiales, en la literatura las podemos encontrar como: flexión, tracción y compresión [1], [2]. Para realizar estos procesos experimentales se emplea una máquina universal de ensayos (MUE), semejante a una prensa, constituida por placas o mandíbulas, accionadas por tornillos o un sistema hidráulico, y puede someter a un material a una fuerza, permitiendo realizar un análisis estructural del mismo [3], [4].

Una situación similar se experimenta en los laboratorios del programa de ingeniería industrial de la Fundación Universitaria de Popayán, en este laboratorio se llevan a cabo prácticas de clase para estudiantes del programa de pregrado de ingeniería industrial, donde se emplea una máquina universal de ensayos Torcopren's diseñada y construida como proyecto de grado en el año 2012 [5]. La máquina integra una estructura que soporta una unidad de control (Delta-DVP28SV), un motor trifásico usado como accionamiento mecánico (ABB M2QA-5HP), una celda de carga, un tornillo sin fin y un mecanismo de compresión, permitiendo a profesores y estudiantes realizar pruebas experimentales, tales como compresión y tensión, en acero y teflón.

Actualmente la MUE Torcopren's, presenta un detrimento y desactualización de componentes como es la celda de carga y el sensor de desplazamiento lineal, necesarios para realizar ensayos de compresión en materiales más sensibles como el PLA (ácido poliláctico), el cual es un biopolímero termoplástico biodegradable, cuyas propiedades físicas y mecánicas, han permitido su uso en la industria alimentaria, farmacéutica, agricultura, textil y plástica.

Igualmente, la máquina está limitada en cuanto a la recolección de información, visualización y control de fuerza aplicada, al no disponer de una interfaz de usuario,

para el monitoreo y supervisión durante los experimentos, que permita presentar los resultados en diagramas de esfuerzo/deformación, así como el ajuste de parámetros de control de carga, visualización y registro de datos de otras variables físicas indispensables.

El uso de un sistema supervisión y monitoreo, puede ser una alternativa para la adecuación de la máquina Torcopren's, que permita manipular de forma segura el procedimiento de ensayos con PLA siguiendo la normativa ASTM D695-15 de la (*American Society of Testing Materials*), para la determinación de propiedades mecánicas de compresión en materiales plásticos [6]. Por otra parte, la retroalimentación en tiempo real, mediante la implementación de sensores de accionamiento, proveerá información relevante que será usada en los procesos de supervisión, diagrama de deformación/esfuerzo y almacenamiento de datos, permitiendo que los estudiantes puedan tener una herramienta de fácil acceso, para analizar gráficamente las variables obtenidas, durante los ensayos de compresión; es así como esta tecnología aplicada en la automatización de procesos industriales se perfila bajo la siguiente pregunta de investigación:

¿Con el desarrollo de un sistema de supervisión y monitoreo, a través de la instalación de sensores y actuadores, se podrán ejecutar ensayos de compresión uniaxial en piezas cilíndricas fabricadas en material PLA en la máquina universal de ensayos Torcopren's?

## **1.2 Justificación**

### **1.2.1 Teórica**

Mediante la automatización, supervisión y monitoreo de la MUE en el proceso de pruebas de resistencia de materiales, se facilita la determinación de las características físicas y de fatiga de los materiales a ensayos de compresión del material PLA, observando su comportamiento en tiempo real.

### **1.2.2 Práctica**

Esta experiencia, abre un gran campo del conocimiento, en la práctica del proceso de equipamiento, programación de lenguajes para su automatización, supervisión y monitoreo, como también, brindar un aporte tecnológico de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, en beneficio de los estudiantes de Ingeniería Industrial de la Fundación Universitaria de Popayán, siendo en componentes, una herramienta que les permitirá realizar sus propias prácticas de materiales con datos precisos y que se puedan almacenar dentro de la base de registros del sistema.

### **1.2.3 Metodológica**

La investigación de forma experimental está fundada en variables cuantitativas del orden numérico y gráfico, que consiste en realizar una acción de mejora en la MUE, la cual esta carente de interfaz de usuario para monitoreo y supervisión, cambiando su estado inicial, con el desarrollo de actividades programadas, con el objeto de dejarla apta, para ejecutar ensayos de compresión sobre PLA de forma automatizada con un sistema de supervisión y monitoreo.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Implementar un sistema de supervisión y monitoreo, para la máquina universal de ensayos Torcopren´s que permita la realización de prácticas de compresión uniaxial sobre PLA.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Definir los requerimientos de un entorno, diseñado a partir del enfoque de supervisión y monitoreo, para realizar prácticas de compresión de materiales con PLA, acorde con los recursos disponibles de la MUE Torcopren´s.
- Implementar funcionalidades como supervisión y monitorización de variables en el proceso de compresión de PLA, en la máquina Torcopren´s.
- Evaluar el entorno de supervisión y monitoreo implementado en pruebas de compresión uniaxial para la MUE Torcopren´s, mediante diagramas de ESFUERZO-DEFORMACIÓN obtenidos durante ensayos con probetas fabricadas con material PLA.

### **1.5 Enfoque metodológico**

A continuación, se presenta una metodología de investigación experimental-cuantitativa que permitió identificar y comprender los lineamientos para abordar el desarrollo del proyecto como; el funcionamiento de la MUE Torcopren´s, ensayos de compresión, sistemas de supervisión, procesamiento, y control. La Tabla 2 organiza las fases, actividades, los entregables y herramientas usadas en las actividades individuales.

Para el diseño Hardware y Software se abordó la metodología Top-Down [7] [8] . La introducción de dicha técnica en el proceso de diseño del sistema de supervisión y monitoreo de la MUE Torcopren´s, permite tener un alto nivel de abstracción del sistema, al implementar e incrementar el nivel de detalle según sea necesario. El sistema inicial se subdivide en módulos, estableciendo una jerarquía hasta llegar a

los componentes primarios del diseño. Cada módulo del sistema de supervisión y monitoreo va a ser modelado e implementado mediante diagramas de flujo de proceso (PFD) y diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) [9] , [10], [11].

*Tabla 1. Fases y actividades.*

Objetivos	Fases	Actividades	Entregables	Herramientas
Objetivo 1	Fase inicial	A1). Investigación conceptual a partir de una búsqueda sistemática sobre sistemas de supervisión y monitoreo orientado a máquinas MUE.	Archivos de bibliografía	IEEEXplorer, ScienceDirect, Mendeley y Word
		A2). Diagnosticar el estado actual de máquina MUE Torcopren's.	Documento que resuma los requerimientos funcionales y no funcionales de la MUE	Excel, Word.
		A3). Definir el procedimiento de ensayo de compresión con PLA.	Documento y diagrama procedimental del ensayo de compresión.	Word, Visio.
		A4). Definir un procedimiento para diseñar el sistema propuesto, y representarlo mediante diagramas de flujo de proceso PFD y P&ID	Documento y diagrama de flujo de la topología seleccionada	Excel, Visio y Word.
		A5). Subdivisión del sistema de supervisión y monitoreo en los siguientes módulos:	Documento con diseños de los módulos y esquemas.	Excel, Visio, Word.



		sistema de adquisición de datos (medición con el sensor de desplazamiento y celda de carga) y HM, con la descripción de elementos que pertenecen a un subsistema u otro, mediante esquemas o diagramas de flujo.		
		A6). Selección del entorno de supervisión y monitoreo el cual se adapte al procedimiento matemático y de visualización necesario para el ensayo de compresión.	Informe de software seleccionado para el diseño del módulo de supervisión e interfaz de usuario (HMI).	Excel, Word.
		A7). Determinación de los parámetros, variables, ecuaciones que debe generar como resultado el sistema de monitoreo para generar los resultados de las pruebas de compresión con PLA.	Documento con parámetros, variables y ecuaciones seleccionados.	Excel, Word.
		A8). Determinación de instrumentación a emplear en la	Documento con revisión	Excel, Word.

		máquina Torcopren's, teniendo en cuenta las propiedades del material PLA descritas en la subsección 2.4, y registrar las variables de carga y desplazamiento, durante la prueba de compresión.	bibliográfica y selección apropiada de sensores de carga y deformación.	
Objetivo 2	Fase de desarrollo	A9). Diseño electrónico del sistema de adquisición de datos.	Diagramas eléctricos del sistema de adquisición.	Visio, Word.
		A10). Diseño visual de la interfaz hombre máquina (HMI).	Diagramas de interfaz (HMI),	Visio, software HMI.
		A11). Diseño y construcción de probetas de PLA.	Plano de probeta en software CAD.	Software CAD
		A12). Adecuación instrumental de la planta Torcopren's, con los sensores y elementos definidos en A8), y el diseño propuesto en A9).	Documento donde describe las mejoras instrumentales, diagramas PFD y P&ID.	Visio, Word.
		A13). Calibración de los sensores y actuadores de la MUE Torcopren's.	Documento con procedimiento de calibración de sensores y actuadores.	Visio, Word.
		A14). Implementación de los módulos de	Código fuente, simulación de funcionamiento	Word, Software de supervisión y monitoreo.

		supervisión y monitoreo definidos en las actividades A5) a A13).	e informe de resultados.	
Objetivo 3	Fase de pruebas	A15). Evaluar el comportamiento del sistema de supervisión y monitoreo, mediante la compresión de probetas de PLA, y graficas de esfuerzo-deformación según la norma ASTM-638 [20].	Informe de resultados de las pruebas de compresión.	Word, Software de supervisión y monitoreo, Excel.
		A16). Comparar los resultados de la prueba de compresión obtenidos en A12), con los registrados en una simulación de deformación en un software CAD, mediante un análisis estadístico ANOVA.	Informe comparativo de resultados estadísticos, simulaciones de esfuerzo deformación.	Word, software CAD y Excel.
		A17). Documentar las actividades desarrolladas durante la ejecución del proyecto, en la monografía.	Documento de texto	Word, Mendeley, Excel, Visio.

## 1.6 Estado del arte

En la actualidad, gracias a los avances en el área de la instrumentación industrial, electrónica y sistemas de control, han permitido apoyar en los procesos de regulación de calidad de materiales y detección de fallas en elementos mecánicos [12], [13]; éste proceso se realiza mediante pruebas de compresión, tensión y deformación de materiales como acero, hierro, hormigón, ácido poliláctico (PLA), entre otros, mediante una máquina universal de ensayos (MUE) [12], [14], midiendo la fatiga de los mismos, permitiendo evaluar el comportamiento físico dinámico de los materiales, y así definir el comportamiento y tiempo de vida útil [15].

Los sistemas de Supervisión y Monitoreo contribuyen a la mejora de la ejecución de los procesos de producción. A través del control y adquisición de datos se pueden solucionar con mayor precisión los problemas que se puedan presentar en la planta. Entre las aplicaciones se encuentran el control de sistemas auxiliares como Ventilación y distribución de energía en laboratorios de física experimental. Estos también son usados como alternativas para optimizar y reducir de consumo de potencia para los sistemas de refrigeración, mediante el control de los ciclos de refrigeración por compresión [16]. En [17], se implementa una aplicación informática encargada de supervisar el monitoreo de una red eléctrica inteligente en las condiciones de una infraestructura menos desarrollada.

La automatización del proceso de pruebas de resistencia en materiales, mediante el diseño e instrumentación de máquinas MUE, facilita la determinación de calidad, características físicas y fatiga de los materiales a pruebas de estrés como compresión, tensión y deformación del material, previniendo su comportamiento frente a estrés estructural [17]. Existen varias investigaciones alrededor del diseño, desarrollo y actualización de máquinas MUE, entre las cuales se encuentra la máquina universal de prueba de tensión y compresión WJ-10. A la cual se diseñó un sistema de adquisición de datos basado en un microcontrolador C8051F020, y un sistema de monitorización empleando en LABVIEW. la comunicación entre la unidad de procesamiento y el computador se realiza con el circuito integrado FT245, el cual permite leer magnitudes físicas de la probeta como (tensión, presión, deformación, temperatura, etc.), la visualización y almacenamiento de los datos históricos, se realiza mediante curvas de esfuerzo/deformación [18].

En el mismo sentido Jingqing, Gao y Shaohua en 2010 [19], implementaron un supervisor y control de un sistema hidráulico para una máquina MUE, basada en una unidad SCM (Single Chip micryoco) con control integral, mediante válvulas de aguja, un convertidor de frecuencia y motor eléctrico, que permite el control de las tasas de tensión y deformación constantes, remplazando los dispositivos costosos basados en válvula proporcional y servo válvula del sistema hidráulico. Así mismo, el alto costo de estos equipos hace necesario que se actualicen, mejorando sus prestaciones durante las pruebas de resistencia de materiales. Agredo, Quintana y

Flórez en 2015 [20], presentan el repotenciamiento de la máquina MUE Shimadzu *UDH 50*, donde se realizó el diseño, implementación y pruebas de un sistema de monitoreo, el cual consistió en desarrollar un plan de mejoramiento de la máquina, mediante el diagnóstico de funcionamiento de la instrumentación, componentes mecánicos y electrónica de control de la misma. Para la actualización se diseñó una interfaz en *Labview*, y como unidad de recolección de información emplean: una tarjeta de adquisición de datos (*DAQ*), tarjetas de acondicionamiento de señales y potencia, así como un PC, lo que permite registrar los resultados de los ensayos de tensión, compresión de materiales, obteniendo un error de precisión de 0.8%. De manera similar Simbeye en 2016 [21], diseñó un sistema con tecnología de instrumentación virtual, que permite supervisar y controlar la máquina de pruebas universal reacondicionada. El sistema de control y monitoreo emplea un microcontrolador AVR Atmega 64 (MCU), que enlaza y controla los periféricos como sensor de fuerza, desplazamiento, deformación, y una unidad de servo control que funciona como accionamiento durante las pruebas de Tracción y deformación. La unidad de control utiliza comunicación *RS232* y *MODBUS* para enlazar el driver del servo motor y sensores con el controlador PID (*Proporcional, integral y Derivativo*), el cual permite regular la velocidad de la prueba, desplazamiento y fuerza aplicada. Los datos son censados por un conversor analógico digital (*ADC-7705*), y procesados en un software de monitoreo desarrollado en *LabWindows/CVI* de *National Instruments*, permitiendo visualizar parámetros como área, máxima fuerza, deformación, tensión, elongación y longitud de la probeta.

Eventualmente, el diseño, la instrumentación y la actualización de componentes electromecánicos en máquinas universales, para pruebas de tensión en materiales ha mostrado buenos resultados en cuanto a la medida de las propiedades mecánicas del material analizado, como lo indica la investigación de Huerta en 2010 [4], en la cual se realiza un diseño, construcción, calibración y medición de la máquina para pruebas de tensión de materiales geométricos de película polimérica comercial (Kapton 500 HN), cuyos resultados de elasticidad y punto de fluencia fueron similares a los dados por el fabricante y la MUE comercial *Shimadzu*. La máquina universal de ensayos construida tiene la capacidad de medir una carga hasta 220 N con sensibilidad de 1.2345 mV/V mediante una celda dual de carga HTC-50, con elongación de 0.001 mm y desplazamiento de 25mm obtenidas con un micrómetro *Starret*. La deformación mecánica se realiza por medio de un motor paso a paso con una velocidad de 0.001mm/s; también se emplea una interfaz de monitoreo diseñada en *LabView* y emplea el protocolo de comunicación *RS232* para recolectar la información de los sensores.

Por otra parte, Gastelum, Hernández, Benjamín, Vega y Muñoz en 2018 [22], realizaron un análisis de las propiedades mecánicas (refuerzo y matriz termoestable) de materiales compuestos con resina epóxica y fibra de carbono. Durante las pruebas de tensión y tracción, se utilizó una MUE Shimadzu con celda de carga de 100 KN, y una velocidad de compresión de 2mm/min. Para esto se emplearon 10 probetas tipo I con densidad  $1.10 - 1.20 g/cm^3$  manufacturadas con el método *VACCUM BAG WET LAY-UP*, siguiendo las normas *ASTM 638* y *D3039*, que describen la geometría de las probetas, y el proceso a realizar en cada prueba. Los resultados indicaron que el comportamiento del material compuesto con fibra de carbono y resina epóxica, absorbe y distribuye el esfuerzo aplicado por las cargas aplicadas a la matriz polimérica, evitando el desprendimiento del material.

Igualmente, Afrose, Masood, Lovenitti, Nikzad y Sbarski en 2016 [23], [24], realizaron una investigación de las propiedades de tracción del material termoplástico PLA usado en la impresión 3D. En las pruebas se emulo un hueso canino con diferentes orientaciones, y dimensiones según la norma *ASTM 638*; la prueba de tracción se realizó con una máquina universal de ensayos *Zwick Z010*, que permite una carga máxima 10 KN a una velocidad controlada de 500mm/min por un software de supervisión *TestXpert II*. Los resultados fueron analizados mediante una curva de tensión y deformación, que evidencio la influencia de las propiedades de tracción del PLA con respecto a la orientación geométrica de las probetas, siendo la orientación en el eje X la de mejores características con una tensión de tracción del orden de 60 a 64 %, con respecto a una probeta de PLA con una orientación de construcción de 45 y -45 ° con respecto al eje Y. De forma similar Kumar y Narayan en 2014 [25], realizaron una investigación sobre la resistencia del PLA impreso en 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*), empleando probetas tipo IV y especificaciones según la norma *ASTM 638*. La resistencia del PLA es analizada a través de una prueba de tracción con una MUE *Shimadzu*, con carga de 5.0 kN y velocidad 5 mm/min constante con una precisión de 0.01 N hasta el punto de rotura. Las pruebas de tracción fueron comparadas con una simulación de análisis estructural estático con un extremo fijo mediante el software *ANSYS 16*, obteniendo un esfuerzo máximo de 63.577 y 54.46  $N/mm^2$  para una carga de 1489.53 N, una deformación máxima de 2.336 y 2.4940 mm para una carga de 1428.67 N, deformación elástica máxima de 4.06 y 6.23 % para una carga de 1428.67 y una resistencia de tracción de 54.46  $N/mm^2$ , lo que indica que las piezas impresas en 3D son similares a las de uso convencional, y por tanto pueden ser empleadas en aplicaciones industriales y de embalaje.

Kweon, Choi, Kim y Nam en 2006 [26], han propuesto micro máquinas de ensayo universal, con una estructura y actuadores de precisión bimorph tipo *PZT* que controlan el desplazamiento máximo, carga e histéresis con precisión nanométrica, permitiendo medir las propiedades mecánicas en el proceso de compresión y carga; compensado el error de linealidad de la etapa de posicionamiento fino. Las máquinas de ensayo universal también son empleadas para analizar la etapa de maduración y firmeza de la superficie de frutas, como lo indica la investigación de Holt en 1970 [27], donde se realiza una prueba de compresión con una MUE *INSTRON*, punzando un tomate a una velocidad 1cm/min con una punta de 0.040 pulgadas de diámetro; las variables fuerza y desplazamiento se emplean para analizar las diversas partes de la estructura del tomate, detectando anomalías en la etapa de maduración, y diferencias estructurales entre variedades de tomate.

Como se menciona anteriormente, las características de instrumentación, supervisión y monitoreo de una máquina universal de ensayos determinan el tipo de ensayo que se puede realizar, estas características igualmente definen los atributos de los dispositivos electrónicos que componen una máquina MUE. El sistema de supervisión y monitoreo a implementar se enfocará en el proceso de compresión uniaxial sobre PLA para la MUE Torcopren's.

## **1.7 Marco Teórico**

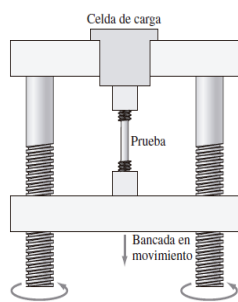
A continuación, se presentan los elementos que se deben tener presentes para contextualizar los aspectos más relevantes de la máquina universal de ensayos en pruebas de compresión de materiales, como: clasificación, funcionamiento y componentes mecánicos de la MUE, la teoría de ensayo de compresión de materiales, propiedades físico-mecánicas del PLA, y sistemas de supervisión y monitoreo de las variables medidas.

### **1.7.1 Máquina de ensayos universal (MUE)**

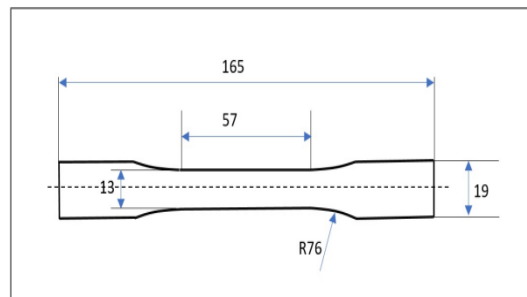
La máquina de ensayos universal es una herramienta que permite medir las propiedades mecánicas de materiales como acero, hierro, plástico, PLA, madera, mediante ensayos de tracción, compresión o flexión. Para realizar los ensayos, la MUE emplea un sistema que aplica una carga de forma controlada sobre una probeta con medidas preestablecidas (Figura 1). La presión se ejerce a través de placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico (Figura 2). Los resultados experimentales son analizados mediante gráficos de deformación que indican el momento de ruptura, fuerza aplicada y deformación de la probeta [28], [29].



Figura 1. Máquina de Ensayos Universal-25 [24].



a). Mecanismo de accionamiento para compresión.



B). Boceto de Probeta norma ASTM-D638 en mm.

Figura 2. Esquema de funcionamiento de la MUE durante prueba de tracción con probeta [30].

Las MUE se clasifican por el modo de accionamiento (hidráulico y mecánico), y la estructura que las compone (Mono espacio o Doble espacio). El método de accionamiento hidráulico se basa en el intercambio de presión hidráulica por medio de bomba, pistones y cilindros, que proporcionan un desplazamiento lineal que comprime el material de estudio, permitiendo observar la capacidad de un material para resistir la fuerza generada por la máquina, calculando el límite de fluencia, el área de deformación y punto de ruptura de la probeta (Figura 3) [19]. En el caso de las MUE con accionamiento mecánico se componen de un motor eléctrico, que transforma la energía eléctrica en mecánica, y la transmite mediante un cabezal móvil, comprimiendo la probeta de estudio (Figura 4) [30] , [31].



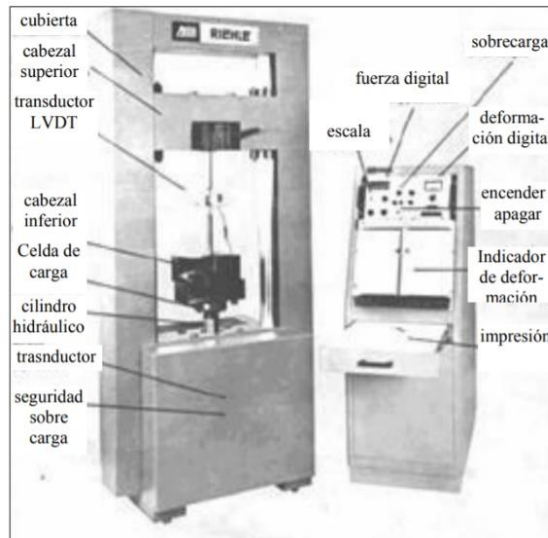


Figura 3. Máquina universal de ensayos Hidráulica [14] .

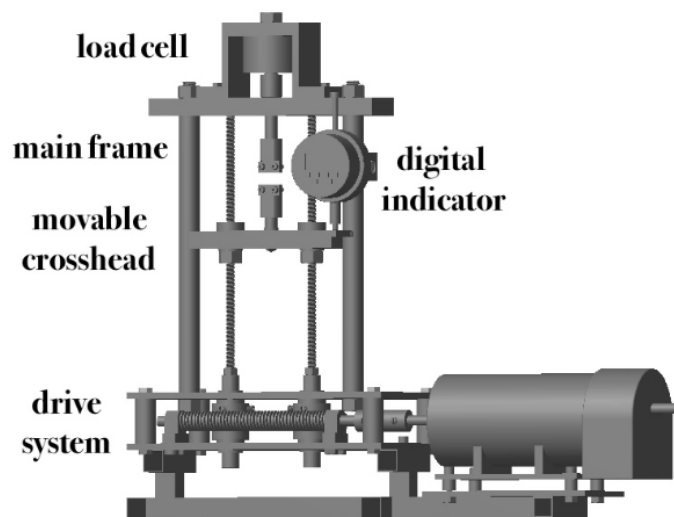


Figura 4. Máquina universal de ensayos mecánica [4].

En cuanto a la estructura, las MUE mono espacio (Figura 5), se componen de cabezales superior e inferior y dos columnas que los soportan. El cabezal contiene dos mordazas que permiten fijar las probetas de ensayo; en contraste, las estructuras doble espacio tienen un sistema móvil con dos cabezales y dos columnas independientes y un sistema fijo con un cabezal y dos columnas que soportan el armazón de la MUE (Figura 6) [30] , [31].

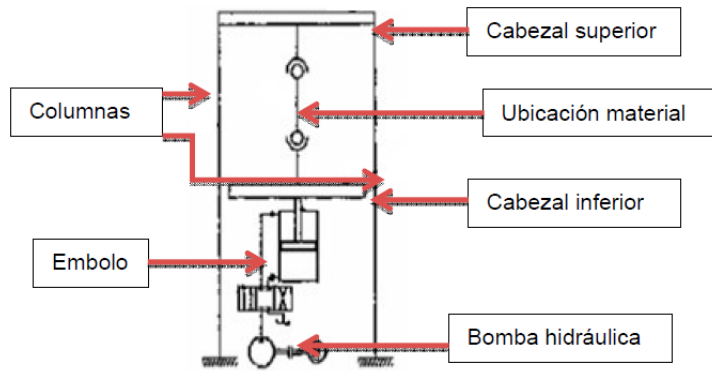


Figura 5. Máquina universal de ensayos mono espacio [30].

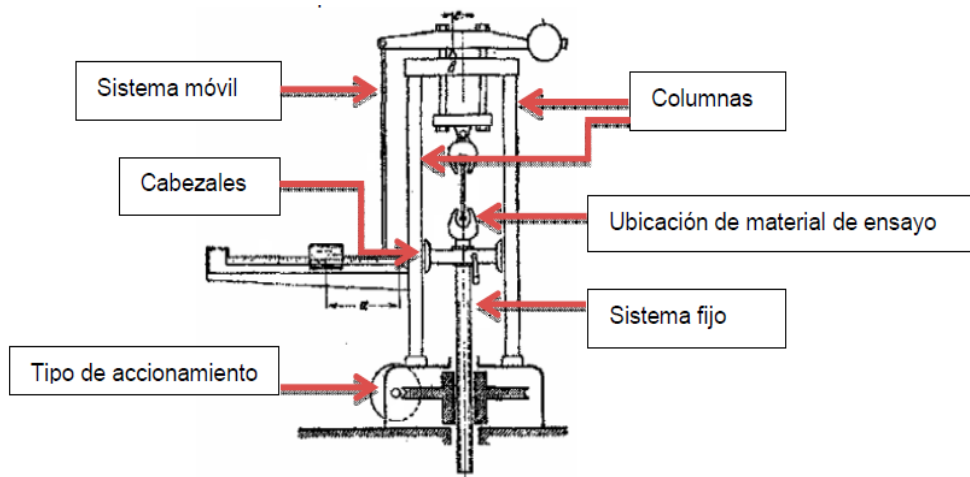


Figura 6. Máquina universal de ensayos doble espacio [30].

Para realizar las pruebas de tracción (compresión) es necesario que la máquina de ensayos universal cumpla con unos requisitos como alcanzar la fuerza necesaria para romper la probeta, controlar la velocidad de formación de la probeta, registrar la fuerza aplicada y deformación de la probeta.

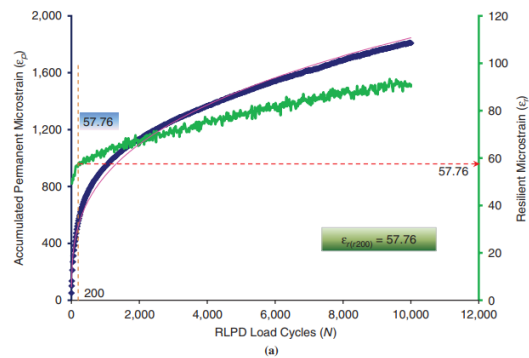
### 1.7.2 Prueba de compresión

El ensayo de compresión es un método donde se someten ciertos materiales a un ensayo para obtener sus propiedades mecánicas [32]; ésta prueba se realiza aplicando cargas uniaxiales crecientes a velocidades completamente bajas y constantes, provocando deformaciones transversales y longitudinales a las probetas. El ensayo se ejecuta mediante el posicionamiento de los cabezales, el primer paso lo realiza el cabezal central móvil desplazándose verticalmente hasta alinear y colocar la probeta en las mordazas del cabezal fijo superior. Mediante la

acción del cilindro hidráulico se emplea una carga constante axial, la cual se trasmite hacia los cabezales fijos y ejes lisos [26] . Esta fuerza se calcula mediante la celda de carga que se encuentra en la parte superior del área de ensayo, a medida que la carga aumenta gradualmente el espécimen va sufriendo cambios longitudinales y transversales hasta llegar a la rotura, estos cambios se representan en un diagrama de esfuerzo-deformación (Figura 7) [4], [33], [34].



a). Prueba de Compresión.



b). Diagrama de deformación.

Figura 7. Prueba de a). compresión y, b). diagrama de deformación [24], [33].

El ensayo de compresión permite extraer las diferentes propiedades mecánicas de un material como por ejemplo la resistencia del material, que puede presentarse ante la acción de una carga o fuerza. Para este tipo de ensayos existen varias normas en las que se detallan las medidas, formas y condiciones de las probetas y la máquina, además, además de recomendar ciertas condiciones ambientales para efectuar el ensayo; un ejemplo de la norma es presentado por la sociedad americana de pruebas y materiales con su estándar ASTM D695-15 y ASTM-D638 [6], [35].

El comportamiento de los materiales respecto a su deformación se puede clasificar en dos categorías (dúctiles y frágiles). Los materiales dúctiles se caracterizan por su capacidad de resistencia a grandes deformaciones antes de romperse, por otro lado, en el caso de los frágiles tienen una respuesta baja al alargamiento en el punto de ruptura [36].

En el diagrama de esfuerzo/deformación unitaria se observan las regiones elástica y plástica (Figura 8). La zona elástica representa la capacidad del material de retomar su longitud inicial al cesar la tensión aplicada, mientras que la zona plástica representa el límite de tensión elástico, donde el material no recupera la longitud inicial.

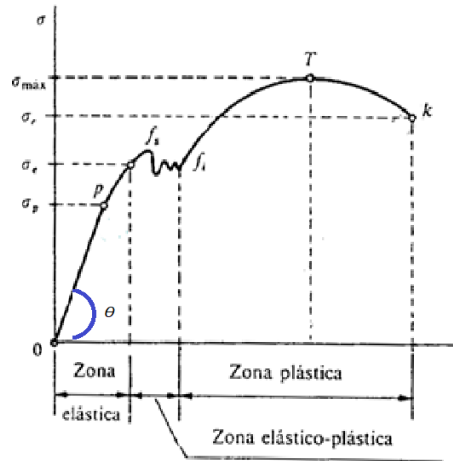


Figura 8. Diagrama de esfuerzo-deformación unitario [37].

- **Esfuerzo ( $\sigma$ ):** El esfuerzo, mide la fuerza distribuida en el área de un material y es un parámetro usado para comparar la resistencia de los materiales; la ecuación 1, representa la distribución de la fuerza axial ( $P$ ), sobre un área de sección transversal ( $A$ ).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

- **Deformación ( $\epsilon$ ):** Relaciona los cambios en la estructura con la fuerza de compresión axial, cambiando su longitud. La expresión matemática que representa el alargamiento o compresión final ( $\delta$ ) y la longitud inicial ( $L$ ) del material es (Ecuación 2).

$$(\epsilon) = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

La expresión (2) es correcta, cuando el elemento sometido a tensión tiene una sección transversal constante, el material es homogéneo, y carga axial es uniforme.

- **Límite de elasticidad ( $\sigma_E$ ):** Valor máximo de tensión que puede soportar un material, manteniendo su comportamiento elástico.
- **Módulo Young ( $E$ ):** Es la relación entre la tensión aplicada y el alargamiento producido, en la zona de comportamiento elástico del material, y es definido por la pendiente de la recta y la tangente del ángulo formado en la zona elástica (Ecuación 3).

$$E = \text{tang}(\theta) \quad (3)$$

- **Tensión de rotura ( $T$ ):** Tensión máxima que soporta un material.

- **Alargamiento a la rotura:** Es la deformación relativa del material hasta la rotura, se obtiene midiendo desde el punto de ruptura de forma paralela hasta la recta de la zona elástica, o de forma numérica porcentual (*Ecuación 4*).

$$\%A = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100 \quad (4)$$

Donde  $L_f$  es la longitud final, y  $L_o$  es la longitud inicial de la probeta.

- **Estricción:** Medida de reducción de la sección del material, antes y después de la rotura (*Ecuación 5*).

$$\%Z = \frac{S_o - S_f}{S_o} * 100 \quad (5)$$

Donde  $S_f$  es la sección final, y  $S_o$  es la sección inicial de la probeta.

- **Área bajo la curva de tracción:** Mide la energía absorbida durante el ensayo de tracción e indica la tenacidad del material.

Para realizar el diagrama de fuerza de formación real, se relacionan la fuerza y deformación en cada punto de la superficie de la probeta (*Ecuaciones 1 y 2*), como resultado se obtiene las (*Ecuaciones 6 y 7*).

$$\sigma_v = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (6)$$

$$\varepsilon_v = Ln(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

Donde  $\sigma_v$ , es la tensión real,  $\varepsilon$  es la deformación unitaria y  $\varepsilon_v$  es la deformación real.

### 1.7.3 Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico es un polímero biodegradable, empleado como reemplazo de polímeros sintéticos, es decir plásticos a base de petroquímicos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el cual no es apto en aplicaciones de la industria alimentaria, debido a sus propiedades químicas que lo hacen susceptible a la acción microbiana, coste moderado y capacidad de producción masiva para aplicaciones como el embalaje [38]. EL PLA es amigable con el medio ambiente, producido a través del modelado por deposición fundida (FDM), es de gran interés para el campo médico, por su biocompatibilidad en aplicaciones tales como ingeniería de tejidos e implantes [39]; sin embargo, este material al realizar una composición química con otros polímeros biodegradables como el polisuccinato de butileno (PBS), forma un nuevo compuesto que puede mejorar sus propiedades morfológicas, mecánicas, térmicas, y reducir su costo. Por lo tanto, para mejorar las propiedades y reducir el costo de producción es necesario llevar a cabo ensayos de tracción, compresión, y

análisis de morfología, que permitan evaluar el punto de fusión, rotura, elasticidad y deformación del polímero [30], [40].

Para medir la rigidez del PLA se emplea una MUE, a través de una celda de carga que mide la fuerza aplicada y un extensómetro que mide la deformación del material. Las propiedades físicas del PLA son: elongación 7.0 %, temperatura de fusión 130-230 °C, módulo de corte 1287 MPa, elasticidad 3500 MPa, dureza 88 Hr, límite elástico 70 MPa, resistencia a la flexión 106 MPa, razón de poisson 0.360 V, resistencia a la tracción 73 MPa, módulo de tracción 2.7-16 GPa, y cristalinidad 37 % [25], [41], [42]. Estas propiedades varían de acuerdo con la composición y aplicación del material.

En cuanto a la evaluación de las propiedades de PLA, se emplea el estándar ASTM D638, donde se especifica las dimensiones de la probeta (Figura 9), y Tabla 2 respectivamente.

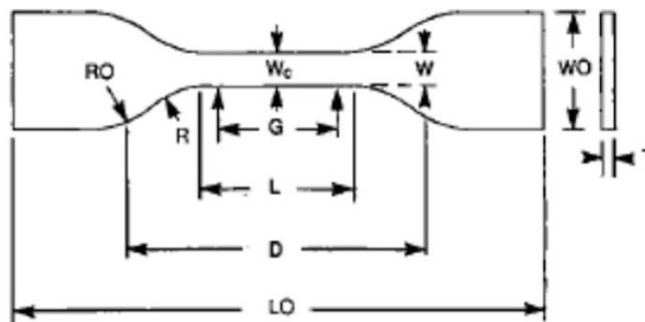


Figura 9. Diagrama de probeta norma ASTM-638 [25].

Tabla 2. Dimensiones de probeta para pruebas de tracción, norma ASTM-638 [25].

Dimensiones	Unidad (mm)
Longitud de la sección (L)	33
Ancho de la sección (W)	6
Longitud total (LO)	115
Ancho total (WO)	19
Radio de empalme (R)	14
Radio exterior (RO)	25
Distancia entre empuñaduras (D)	65
Longitud del calibre (G)	25

#### 1.7.4 Sistemas de supervisión y monitoreo

En la actualidad, gracias a los avances en el área de la automatización industrial, los sistemas de supervisión y monitoreo han permitido a investigadores e ingenieros desarrollar e implementar soluciones efectivas a la hora de supervisar, controlar y adquirir información relevante de un proceso industrial, integrando la instrumentación de proceso con herramientas software y tecnologías independientes. Garantizando el funcionamiento del sistema [9], [43]; Es así como los comités de estandarización para procesos de control han propuesto una serie de estándares y especificaciones como OPC (Open Platform Communications), que permiten la interacción entre los componentes de un proceso en tiempo real [44]. Entre las aplicaciones de los sistemas de supervisión están el control de sistemas auxiliares Como: distribución de energía, refrigeración y manipulación de turbinas en laboratorios de física experimental [11], [12], [43] .

Las características de un sistema de supervisión y monitoreo son [9], [43], [45]:

- **Adquisición y almacenamiento de datos:** Mediante la instrumentación de un proceso, permite medir, procesar y almacenar la información recibida, en forma continua.
- **Interfaz de usuario:** Permite representar visualmente las variables del proceso, mediante una interfaz HMI (Human Machine Interfaz) desarrollada para computadoras.
- **Acciones de control:** Realiza la ejecución de tareas que permiten modificar la evolución del proceso, actuando sobre operaciones como consigas, menú, alarmas etc., que influyen directamente sobre el proceso mediante las salidas de los periféricos.
- **Conectividad:** Se da entre la interfaz HMI, los sensores, actuadores y unidad de control, que permita realizar la automatización o control del sistema.
- **Supervisión:** Observar la evolución de las variables de control del proceso instrumentado, a través de la interfaz HMI, normalmente es una tarea del personal encargado de proceso.

#### 1.7.5 Normas aplicadas

*Tabla 3. Tabla de Normas aplicables, fuente propia.*

	Norma	Descripción
--	-------	-------------

1	ASTM D695 [46].	<p>Define un método de prueba para determinar las propiedades mecánicas de los plásticos rígidos reforzados y no reforzados, incluidos los compuestos de alto módulo, cuando se cargan con compresión a una tensión uniforme relativamente baja o tarifas de carga. En este método de prueba se utilizan probetas de forma estándar. Este estándar se aplica a un módulo compuesto de hasta 41.370 <i>Mpa</i>(hasta 6 millones de psi). En ASTM D695-15, los parámetros experimentales típicos a considerar con respecto a las propiedades de compresión de las pruebas de plástico rígido son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de muestras de prueba: cinco a menos que el material sea anisotrópico</li> <li>• Velocidad de prueba: 1,3 a 3 mm/min</li> <li>• Temperatura de acondicionamiento y prueba: 23 más / menos 2 grados</li> <li>• Prueba de acondicionamiento y humedad relativa: 50 más/menos 5 por ciento</li> </ul> <p>Los factores que se deben tener en cuenta al realizar pruebas con ese estándar incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación de la muestra</li> <li>• Acondicionamiento de muestras</li> <li>• Dimensiones de la muestra</li> <li>• Tasa de carga de la muestra</li> <li>• Si el material es anisotrópico.</li> </ul>
2	Modelado ISA S88 [47].	<p>Este documento propone y desarrolla un procedimiento organizado para realizar el modelado de la norma ISA S88, (partes 1 y 2), en la ejecución de órdenes de producción basadas en récipes, aplicado a un caso de estudio. Dicho procedimiento proporciona pautas para editar los modelos físico y de control procedimental en las herramientas del software industrial, de manera que dicha edición se haga de una forma adecuada, precisa y organizada. Además, se incluyen pasos que permiten construir diagramas de tuberías e instrumentación (P&amp;ID), de tal forma que tanto los modelos de proceso, físico y de control procedimental, establecidos en ISA S88, así como el diagrama P&amp;ID sean diseñados con la misma información y sean coherentes entre sí.</p>



3	IEC 61131-3 [48]	<p>Esta norma trata los lenguajes de programación y define los estándares de dos lenguajes gráficos y dos lenguajes textuales para PLC:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Diagrama de contactos (LD – Ladder Diagram), gráfico.</li><li>• Diagrama de bloques de funciones (FBD – Function Block Diagram), gráfico.</li><li>• Texto estructurado (ST – Structured Text), textual.</li><li>• Lista de instrucciones (IL – Instrucción List), textual.</li><li>• Bloques de función secuenciales (SFC – Sequential Function Chart), con elementos para organizar programas de computación paralela y secuencial.</li></ul>
---	------------------------	--

## **2 CAPÍTULO: PROCESO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL SOBRE PLA EN LA MUE TORCOPREN'S**

### **2.1 Descripción del proyecto de supervisión y monitoreo**

Técnicamente el proyecto consiste en implementar funcionalidades de supervisión y monitoreo de las variables del proceso de compresión en la MUE Torcopren's, así mismo, en este entorno, evaluar las pruebas mediante diagramas de esfuerzo-deformación obtenidos durante los ensayos con probetas fabricadas con material PLA.

Para lograr los objetivos planteados, se desarrolló una serie de actividades con el fin de mejorar y actualizar la máquina para realizar las pruebas mencionadas. Para ellos se debe ejecutar como primera medida, un diagnóstico para conocer los requerimientos de operación y conocer la instrumentalización actual, tanto en ventajas como desventajas. En segunda instancia se desarrolló un diseño del sistema de supervisión y monitoreo que integra aspectos de tipo hardware y software en una arquitectura funcional de operación basada en el estándar ISA88.

Para abordar lo antes mencionado, se ha tomado como fundamento la teoría de la Automatización de los procesos industriales, la cual se puede entender como una actividad tecnológica que busca sustituir, en una actividad determinada, al operador humano por dispositivos mecánicos, electrónicos o herramientas software [50]. El modelo estructural general de las soluciones de automatización es similar a la Figura 10, en la cual se observa que la forma correcta y común del proceso de automatización consiste en: comprender el proceso productivo en detalle, definir las variables del proceso a medir, bien sea como variables manipuladas o controladas, y además definir la tecnología de control que se encargará de capturar, procesar y manipular las señales desde los sensores y actuadores. Otras características adicionales respecto al dispositivo lógico de control es que debe poseer capacidades de comunicación con otras unidades u operarios" [49].

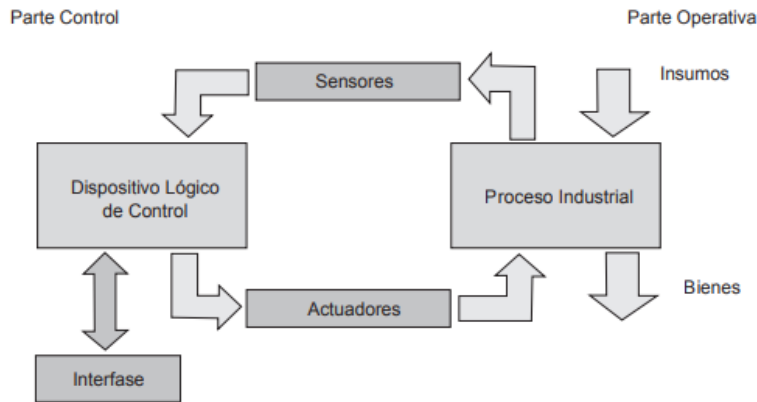


Figura 10. Modelo de estructura de la automatización de procesos.

El anterior modelo de estructura en automatización será ejecutado en su parte operativa por la máquina de compresión Torcopren's, mediante la ejecución de un proceso de compresión uniaxial, en el que se ejerce una presión sobre una probeta cilíndrica de material PLA mediante sus platos o acoples, a través de la cual, se va a generar como producto, una serie de información de las variables de esfuerzo-deformación.

Dentro del proceso de compresión, producto de la acción de fuerza y velocidad de los equipos actuadores, se genera un ciclo de información dada por una serie de sensores que emiten señales electromecánicas, las cuáles serán las entradas al hardware de control del autómatas lógico programable, para ser procesadas y convertidas en señales digitales de salida.

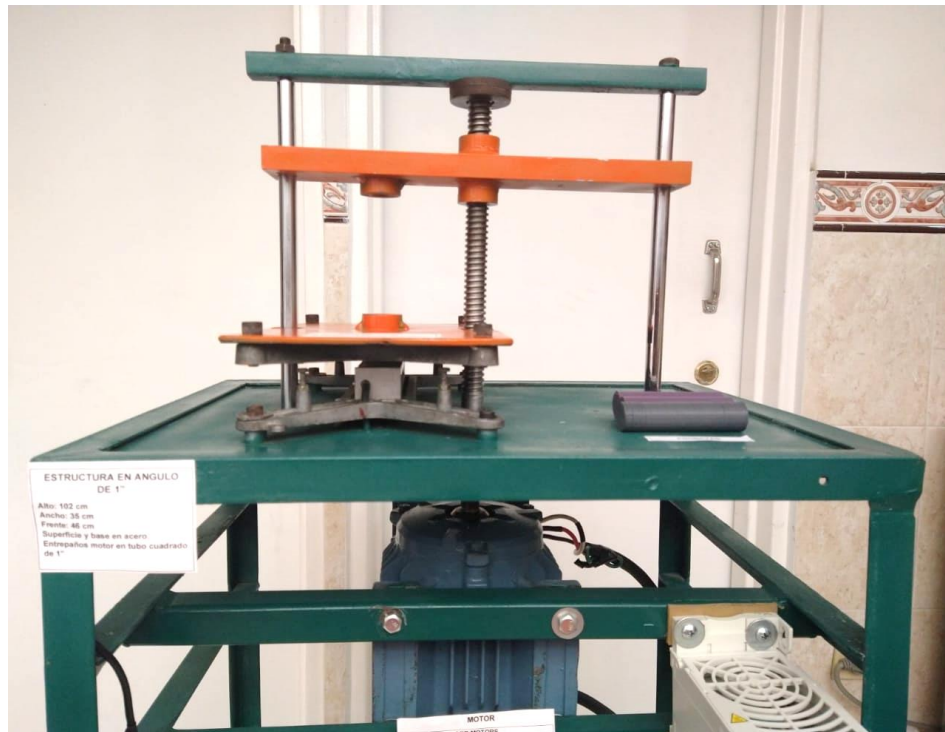
Este dispositivo de control **Delta PLC** debe ser programado con el software de desarrollo **ISPSoft** para controladores lógicos programables de la familia Delta, dicha programación se realiza generalmente en lenguaje de contactos **Ladder**, con ayuda la interfaz de comunicación **COMMGR** entre el PLC y computador. Así mismo, se instala el software de **supervisión y monitoreo DIAView** que permite monitorear las variables medidas mediante TAG's que identifican y envían los datos de las variables de proceso hasta la interfaz de monitoreo, lo anterior automatiza el procedimiento de recolección de datos, los cálculos y la validación en tiempo real del ensayo, permitiendo presentar la información en reportes de forma gráfica.

Dentro de la nueva instrumentación añadida a la máquina, se reemplazó la celda de carga por una de mayor capacidad, aunque conservando las dimensiones físicas del nuevo sensor para no alterar la disposición física de las mordazas o el cabezal. La celda de carga original contaba con un límite máximo de medida de 30kg de carga lineal aplicada, lo cual era insuficiente para realizar un ensayo completo de compresión sobre PLA, pues es necesario al menos dos veces esta fuerza para realizar un ensayo completo de compresión. De acuerdo con lo anterior, la nueva

celda de carga instalada cuenta con una sensibilidad de  $1.8 \pm 0,02$  mV/V, conservando la morfología de la celda de carga monobloque, su referencia es **SP06 LEXUS**, la cual permite medir hasta 40Kg de carga, suficiente para ensayar compresión sobre probetas de PLA.

Otro de los cambios notorios sobre la máquina es el actuador de deformación mecánica, anteriormente la máquina poseía un motor asíncrono de 0.5HP de potencia, conectado directamente al eje tipo tornillo sin fin, el cual desplazaba las mordazas con respecto al cabezal (Figura 11). Este diseño mecánico no era viable por dos razones. En primer lugar y la más importante, no generaba suficiente torque traducido en fuerza de compresión mediante el eje sin fin de conexión directa con el rotor del motor, tanto para altas como para bajas velocidades. A razón de esto se necesitó un arreglo mecánico que permitiera realizar el ensayo a bajas velocidades, pero con suficiente fuerza para romper la probeta. Por esta razón se decidió añadir una caja mecánica del tipo reductora, que permitiera aumentar el torque del eje y por ende la fuerza de compresión de las mordazas, mientras la velocidad era muy baja. La nueva caja reductora no era compatible mecánicamente en su empotre y sujeción del motor, al igual que muchas de las cajas reductoras comerciales con respecto al motor original de la máquina. Por esta razón, se decidió que el nuevo motor debería contar con la caja reductora empotrada desde la fábrica.

La segunda razón en esencia es del tipo eléctrica, pues al intentar cambiar el pequeño motor por uno de mayor fuerza, esto implicaba actualizar los componentes eléctricos de potencia relacionados con el motor por algunos de mayor potencia, entre estos componentes el más importante y costoso es el variador de velocidad con potencia máxima de 0.7HP, por lo cual se decidió elegir un motor con caja reductora empotrada, que cumpliera las especificaciones de torque, velocidad, sujeción mecánica y consumo energético dentro las capacidades de los componentes actuales de la planta y así no aumentar el costo del proyecto.

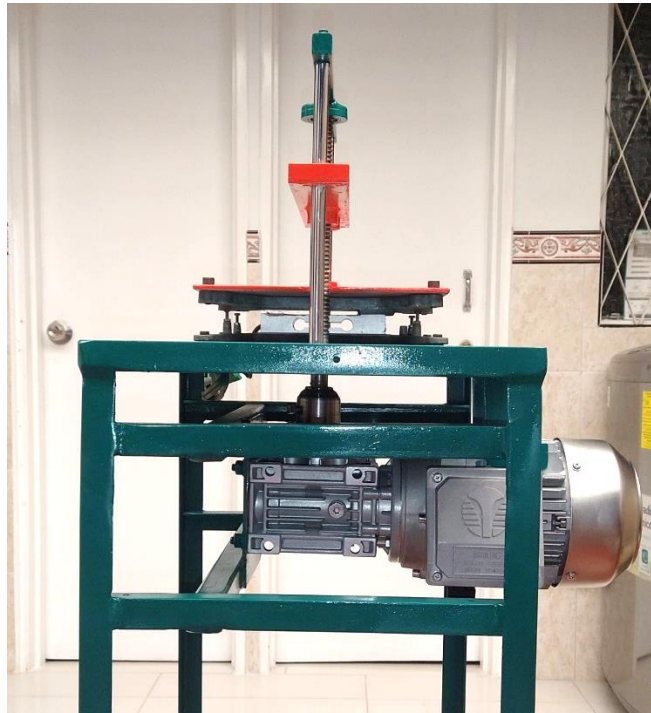


*Figura 11. Actuador de deformación original (no útil).*

El nuevo **motor con reductor Techtop** de 0.5HP de potencia en su eje, con velocidad de entrada de hasta 1.665 RPM y salida de 30 RPM, es el motor con reductor de la gama más baja en cuanto a la comparación potencia-torque, pues permite ser controlado mediante el mismo variador de frecuencia **ABB ACS355**. Así mismo, se instalan interruptores finales de carrera para desenergizar el motor al llegar a un punto máximo de recorrido del cabezal, y también en compañía del **Encoder E6C3-6** para medición de desplazamiento lineal mediante pulsos provenientes del Encoder de medición rotacional.

El Controlador Lógico Programable **PLC DVP 28SV DELTA**, instalado en la MUE, cuenta con módulos analógicos y digitales de extensión de funciones, que permiten controlar gran variedad de dispositivos para monitorear la entrada de señales de sensores como: celda de carga, interruptores finales de carrera de 0-24 V y analógicas como la señal de desplazamiento del Encoder de 0-10 V. Además, de modificar salidas digitales para activar actuadores como: el motorreductor y el Variador de frecuencia, conforme al control del programa. A este autómatas programable, se le asignan instrucciones mediante el software **ISPSOFT** utilizando el lenguaje **Ladder**, que se emplea para automatizar el manejo de máquinas industriales. Finalmente se implementa un sistema de interfaz hombre maquina en la herramienta **DIASOFT** para supervisar, monitorear, generar reporte y graficar en

tiempo real el proceso de compresión uniaxial sobre PLA. La nueva configuración mecánica se muestra en la siguiente figura.



*Figura 12. Motor con caja reductora TechTop instalado.*

## **2.2 Modelado ISA S88 del proceso de compresión Torcopren's**

La norma ISA S88 define reglas y procedimientos para procesos de fabricación por lotes, definiendo una arquitectura y modelos que son usados en sistemas de automatización [50]. Esta norma da una visión para determinar una estrategia de control, de tal forma que los resultados se representen por medio de recetas que especifican información relevante de entrada al proceso, necesidades de equipos, medidas interna y salidas con el producto final, representado en la operación eficiente y estandarizada de la MUE Torcopren's.

- **Modelo del proceso MUE Torcopren's**

En el Estándar ISA S88, para el proyecto, se establece la cadena de valor que la constituye los diferentes procesos, y se establece un modelo de operación, determinando los requerimientos de producción, puntos críticos y los resultados a obtener. Su diseño viene dado mediante una serie de operaciones ordenadas, las cuales generan acciones, que realizadas paso a paso en la MUE Torcopren's, permite la realización de prácticas de compresión uniaxial sobre PLA.

Se presentan a continuación la tabla 5 Modelado del proceso

Tabla 4. Modelo de proceso de acuerdo con el estándar ISA88.

Proceso	Etapa	Operación	Acción
Proceso de ensayo de compresión	Etapa de compresión	Preparar probeta PLA	Medir el ancho y la longitud de la probeta y registrar valores.
		Preparación MUE	Colocar probeta PLA cilíndrica
			Ajustar con los acoples
		Prueba	Encender variador
			Iniciar prueba
			Paro de emergencia.
			Opcional encender cámara
Resultados	Generar reporte		

- **Modelo físico del proyecto MUE Torcopren's**

Mediante el modelo físico del estándar ISA88 se estructura el Hardware de la MUE Torcopren's, que incluye: los equipos y los componentes. A continuación, se presentan los perfiles de los equipos y elementos que se requiere para ejecutar las operaciones y acciones del proceso, se identifica su función detallada y se jerarquizan por módulos de operación principales y en términos de módulo de control con sus elementos componentes, tal como se muestra en la tabla 6 Modelo físico.

Tabla 5. Modelo físico de acuerdo con el estándar ISA88.

Celda de proceso	Unidad	Modulo equipo	Módulo control
Sistema de ensayo	Unidad de ensayo	Módulo de carga	Barra marco prensa
			Barra rectangular o cabezal movable
			Tornillo sin fin
			Acoples
			Tornillo sin fin
			Base metálica plataforma

			Plataforma celda de carga
			Celda de carga
			Encoder
			Finales de carrera
		Módulo de mando. Botones	Encender variador
			Iniciar prueba
			Botón Paro de emergencia
			Generar reporte
			Opcional encender cámara
			Ayuda
		Módulo grafico	Grafica esfuerzo-deformación en tiempo real
		Módulo indicador. Indicadores	de luz Apagado-Prendido
			Ventanas de texto Fuerza aplicada en Kilogramos (kg) y Desplazamiento en milímetros (mm).
			Leds luminosos de movimiento del motor de Compresión y Descompresión.
			Salir

- **Modelo de control procedimental del proyecto MUE Torcopren´s**

Permite detallar las operaciones que realiza la MUE a través de secuencias de operación puntuales, orientadas a desarrollar acciones definidas, para la realización de prácticas de compresión uniaxial sobre PLA. A este modelo se le conoce como receta, y se ejecuta en los equipos determinados en el modelado físico. Las acciones de control están ordenadas de acuerdo con cada secuencia de operación y se encargan de la realización del control primordial del proceso. Se detalla en la Tabla 7 el modelo de control de procedimiento.



Tabla 6. Modelo de control de procedimiento de acuerdo con el estándar ISA88.

Proceso	Etapa	Operación	Acción
Proceso de ensayo	Ensayo	Preparar probeta	Medir el ancho y la longitud de la probeta y registrar valores
		Preparar MUE	Ubicar probeta cilíndrica sobre el acople inferior de la base rectangular del módulo de carga
			Alinear probeta con el acople superior del cabezal
		Realizar Prueba	Encender variador
			Iniciar prueba
			Paro de emergencia en el caso de riesgo personal o peligro de deterioro de la maquina
			Opcional grabar procedimiento
Visualizar la curva esfuerzo deformación en el panel gráfico.			
Resultados	Gráfico en Excel curva esfuerzo-deformación		

### 2.3 Diagnóstico físico de la MUE Torcopren's

A continuación, para la MUE Torcopren's en su estado inicial, se presenta tanto los elementos originales de su estructura de soporte, como también el panel eléctrico y los dispositivos mecánicos, esto confirmará aquellos elementos que requieren una actualización, mejora o cambio.

### 2.3.1 MUE composición estructural

Tabla 7. Componentes estructurales.

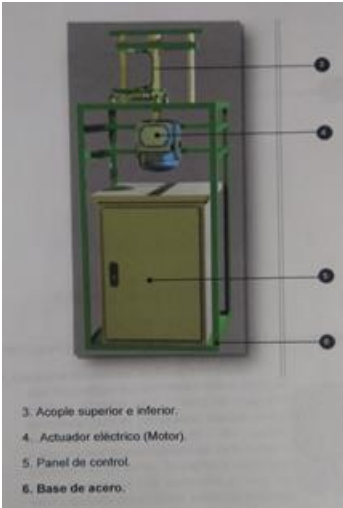

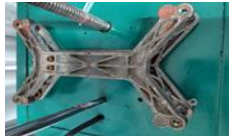


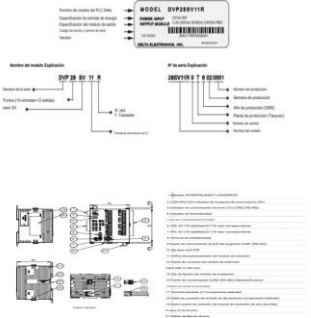

Descripción elementos	Especificación	Grafico
Mesa: altura:1mt, ancho: 46 cm, largo: 35cm	Angulo en hierro 3/4 x1/8"	 <p>3. Acople superior e inferior. 4. Actuador eléctrico (Motor). 5. Panel de control. 6. Base de acero.</p>
Barra superior: 33 cm	Barra solida cuadrada de 3/4"x3/4", 20	
Cabezal movable: largo: 30cm	Lamina solido hierro rectangular 3/4"x1"	
Longitud de guías: largo: 35 cm	Tubo solido hierro diámetro 12mm	
Tornillo sin fin: largo 35cm	Tubo solido roscado hierro: 18mm	
Base lamina de acero rectangular: ancho 46cm, largo:35cm	Lamina acero rectangular espesor 2mm	
Base superior del módulo de carga: ancho: 17cm, largo:25cm2	Lamina acero rectangular espesor 4mm	
Acoples para probeta: diámetro externo 3cm, diámetro interno 12mm, alto 1cm.	Hierro solido	
Área de colocación motor:	Alto 40cm, ancho 46cm, profundidad: 35cm.	
Soportes (2) del motor largo: 46cm	Tubo hierro cuadrado 3/4"x3/4", 16	
Gabinete metálico alto: 60cm, ancho: 40cm, profundidad: 30cm	EPS y CIA S; en C.A: Lamina en acero cold-rolled calibre 18	
Riel DIN para montaje en gabinete cantidad 4	Aluminio	

Tabla 8. Componentes electromecánicos.

Componentes	Especificación	Grafico
Lamina rectangular o cabezal movible	Lamina solido hierro rectangular 3/4"x1"	 <p>1. lamina rectangular. 2. Tornillo sin fin 3. Acoples. 4. Sensor o Elementos de Realimentación, (Celda de Carga).</p>
Tornillo sin fin	Rosca grande 18mm	
Acoples inferior y superior	Diámetro 3 cm	
Censor celda de carga	Celda de carga SUP 1 LOAD CELL con capacidad de 30Kg	
Plataforma para celda de carga de 15cm x 20 cm	Hierro.	
Motor Marca ABB M2 QA 2 polos	0.5HP, 220-230V, 60Hz, 1615 R/min, Coso 0.77, 1.88 A, peso 11kg,	 
Controlador Lógico Programable PLC DVP 28SV		

Módulo de entradas y salidas analógicas	DVP 06XA.S	
Fuente de alimentación para 24DVC	DRP0224V120W1AA	
Borneras cantidades 69	Salzer Conneich SCRW 2.5 U 800V-24 A, 600V-25A	
Disyuntor o Breakers cantidad 2	ETN MWW243268	

### 2.3.2 Actualización de componentes para la MUE Torcopren's

Después de realizar el diagnóstico de la MUE y teniendo en cuenta el objetivo de Implementar un sistema de supervisión y monitoreo para la máquina universal de ensayos Torcopren's que permita la realización de prácticas de compresión uniaxial sobre PLA, para cumplir los objetivos del proyecto se plantea mejorar instrumentos como: actuadores e instrumentar la máquina con elementos necesarios para lograr desarrollar el proceso de automatización y de supervisión y monitoreo, como se relaciona a continuación en las tablas siguientes:

*Tabla. 9 requerimientos de componentes y equipos.*

	<b>Instrumentación para operación</b>	<b>Justificación</b>
1	Variador de frecuencia	Necesario para regular la energía y ajustar la frecuencia y la tensión en función de los requisitos del procedimiento

2	Reductor de velocidad	Necesario para no perder torque en el motor, producto de la disminución de velocidad por el Variador de frecuencia. Opcional motorreductor.
3	Celda de carga máxima 40Kg	Necesario para lograr medir la fuerza aplicada a probetas con mayor densidad de material PLA.
4	Finales de carrera	Sensor electromecánico que detecta la posición de un elemento móvil mediante accionamiento mecánico
5	Encoder	Transductor rotativo que transforma pulsos digitales en distancia para medir variable de deformación.
6	Probetas PLA	Necesaria para desarrollar las pruebas de compresión.
7	Cable de programación PLC-PC	Necesario para desarrollar la interfaz de programación con el PLC
8	Cable de comunicación PLC-PC	Necesario para realizar la comunicación RS485 o serial con el sistema de Supervisión y monitoreo.
9	Modulo DVP02LC	Módulo de lectura de la celda de carga PLC.
10	Modulo DVP-06XA	Módulo de entradas y salidas analógicas (Encoder).

*Tabla 10. Requerimientos de Software.*

	<b>Software</b>	<b>Justificación</b>
1	ISPSOft	Necesario para dar instrucciones al PLC y configurar los modos de operación.
2	Lenguaje Ladder	Lenguaje para generar el procedimiento de automatización de la MUE
3	DIAMView	Para diseñar la interfaz HMI, la cual debe permitir establecer los diferentes modos de funcionamiento de la MUE, transmitir las señales de los sensores: celda de carga, finales de carrera y enconder, para interactuar con los paneles de mando,

	gráfico y de indicadores, así mismo visualizar, guardar datos de la prueba y opcional, grabación del ensayo.
--	--

*Tabla 11. Requerimientos de Hardware.*

	<b>Hardware</b>	<b>Justificación</b>
1	Computador	Como dispositivo para gestionar el módulo de supervisión y monitoreo, con las características necesarias de memoria, procesador, puertos USB, tarjetas de video, sistema operativo XP, para ser instalado el software ISP ISPSOft, Ladder, DIAView con los correspondientes Drivers.
2	Cámara	Opcional para grabar el procedimiento de compresión, mediante webcam USB.

## **2.4 Instrumentación clave del proyecto**

Básicamente se compone de diversos tipos de instrumentos, mecánicos, eléctricos y electrónicos instalados en la MUE Torcopren's, que interconectados miden y controlan las magnitudes físicas de la planta, las cuales se censan o emiten con fines de indicación, computo o de observación.

Después de realizar el diagnóstico del funcionamiento de la MUE, se observan las deficiencias instrumentales o puntos clave a mejorar para el éxito del proyecto, las cuales han tenido una evolución importante (reemplazo, mejora, replanteamiento, eliminación) importante, tal como se describe en los siguientes párrafos:

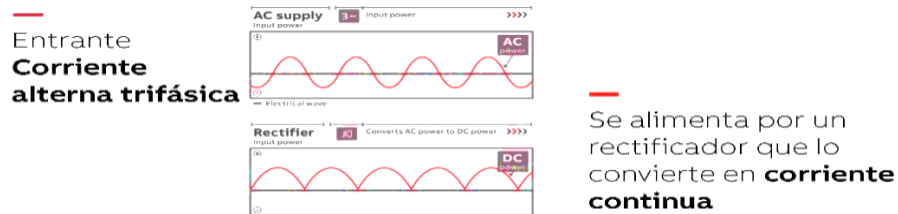
### **2.4.1 Variador de frecuencia**

La máquina cuenta originalmente con un variador de velocidad ABB referencia ACS 355 [51] para regular la velocidad angular del motor reductor mediante ajuste de la frecuencia y la tensión AC. Su configuración se actualiza y se realiza de acuerdo con las especificaciones requeridas en el proceso de compresión y la parametrización del nuevo motor reductor [51]. Las características propias del ensayo de compresión tales como la necesidad de utilizar una velocidad lineal de compresión constante y pequeña, resalta la utilidad del variador de tal forma que regule la velocidad del ensayo alrededor de valores pequeños de velocidad angular

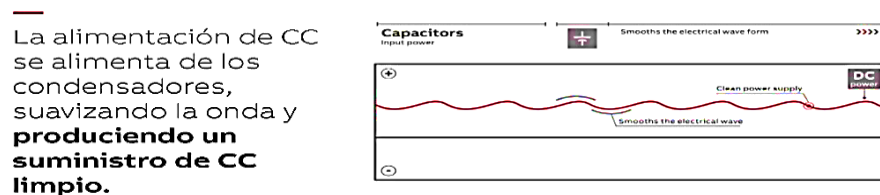
del motor actuador, al igual que otras características técnicas programadas en el firmware del variador, tales como: velocidad máxima y mínima, frecuencia de funcionamiento nominal, torque y corriente del nuevo motor reductor. Otra característica importante que justifica la utilidad del variador en configuración de baja velocidad, con el fin de poder realizar el ensayo lentamente de tal manera que el tiempo de muestreo del PLC sea suficientemente pequeño comparado con el tiempo total de la prueba, para lograr capturar una mayor cantidad de datos de fuerza y desplazamiento, y esto a su vez se traduce en datos con mayor resolución y graficas de mejor calidad del ensayo de compresión.

En la figura 13 se detalla las funciones del variador las cuales son las siguientes; [52]

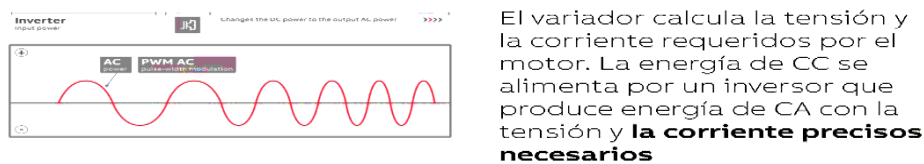
- Convertir la corriente alterna (CA) trifásica mediante un rectificador en corriente continua (CC):



- Suavizar la onda DC:



- Convertir la CC en la variable CA:



- Calcular y repetir:

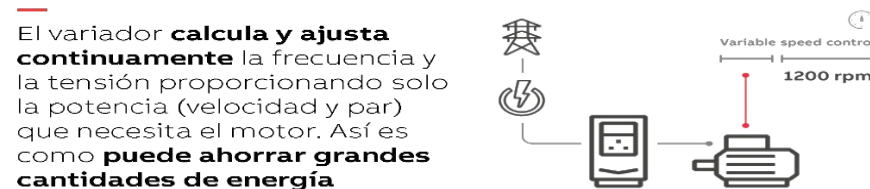


Figura 13. Funciones del variador [52] .

La figura 14a, muestra la disposición de mandos manuales mediante botones para la configuración del usuario. Mientras la imagen 14b, indica su ubicación y montaje en la planta MUE.



Figura 14a. Botones de mando del variador de frecuencia [51].

Figura 14b. Instalación del variador de frecuencia sobre la planta física.

La conexión está especificada con la entrada al convertidor de tres líneas de potencia de alimentación y con salida trifásica hacia el motor, esto de acuerdo con la figura 15. [53] Manual de Usuario ACS355 pagina 49 Instalación eléctrica.

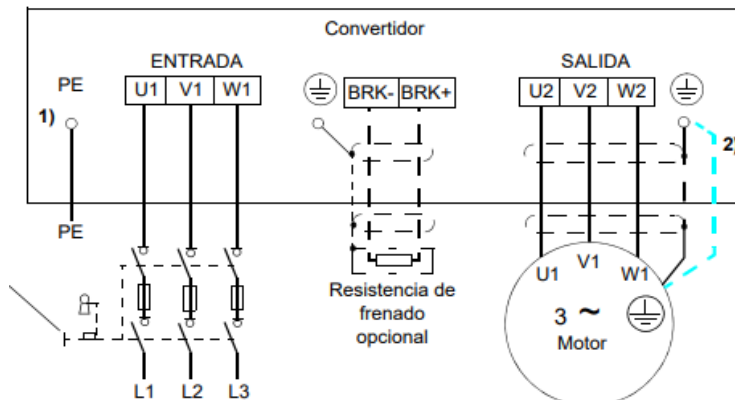


Figura 15. Diagrama de conexión eléctrica del variador de frecuencia [53].

## 2.4.2 Motorreductor

El actuador antiguo instalado en la MUE es de referencia motor asíncrono ABB M2Q de 0.5HP de fuerza sin caja reductora, con velocidad máxima de 1615 RPM en el



rotor del motor, lo mencionado anteriormente se cumple cuando se trabaja con una frecuencia aplicada de 60 Hz. Sin embargo, en el motor reductor se estableció la frecuencia constante de 30Hz desde la configuración de parámetros del variador de velocidad para realizar los ensayos de compresión. En las pruebas realizadas se evidenció que el efecto de la disminución de la velocidad desde el variador menores a 10Hz de salida, implica pérdida de torque motor o fuerza lineal aplicada necesaria para comprimir las probetas de ensayo, por lo cual la frecuencia se estableció en la mitad del rango de frecuencias configurable.

El efecto anterior se corroboró mediante el cálculo del torque, fuerza o potencia de tracción a su velocidad de especificación, aplicando la siguiente formula

$$\tau = \frac{hp \cdot 5252}{rpm}$$

Donde: 5252 es una constante de motor, dada por el fabricante, siendo el torque máximo del eje del motor:

$$\tau_{\max} = \frac{0,5 \cdot 5252}{1615} = 1,62 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Mientras que el torque en el eje del motor a la mitad de la frecuencia es:

$$\tau_{\text{medio}} = \frac{0,5 \cdot 5252}{807.5} = 3.25 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Lo anterior muestra que cuanto más baja sea la velocidad final de rotación del motorreductor, más alto será el torque, teniendo en cuenta que la potencia continúa siendo la misma. Y cuanto más alta sea la velocidad final del motorreductor, más bajo será el torque igualmente manteniendo la potencia consumida por el motor.

Por otra parte, de acuerdo con la norma ASTM 695 la prueba debe realizarse a una velocidad que oscila entre 1.3mm/minuto hasta 3mm/minuto.

Para el cumplimiento de lo anterior, implica disminuir la velocidad del motor, aproximadamente a 30 RPM/min. El cálculo del torque para esta velocidad sería:

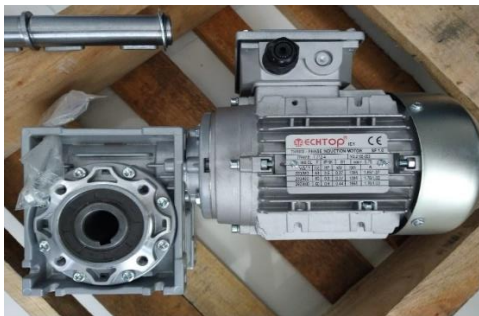
$$\tau = \frac{0,5 \cdot 5252}{30} = 87,53 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

El valor de la frecuencia necesario para cumplir con esto sería alrededor de 1.11Hz, valor que fue configurado en el variador obteniendo resultados negativos, pues el motor no logra vencer la fricción estática y por tanto no gira, por lo cual es necesario configurar una frecuencia de arranque que sirva de impulso rotacional esto no es bueno puesto que la prueba se registra a velocidad variable, tampoco es

recomendado por la normativa para la prueba, además de que el torque para esta configuración de frecuencia es extremadamente pequeño con el cual no se comprime una probeta plástica como se esperaría. Cuantitativamente la disminución del torque equivale a  $1,62600 - 87,6333 = -85.9073 \text{ lb}\cdot\text{ft}$ , la cual es baja, no permitiendo romper la probeta, inclusive con la densidad más baja de fabricación de la probeta.

El defecto anterior se debe a la carencia de un elemento importante conocido como corona o flanche, que permite el acople de una caja mecánica reductora con el eje de un motor asíncrono como el motor original de la máquina, por tanto se opta por reemplazar dicho motor por un motorreductor Techtop [55] que incluye flanche o corona y además caja reductora, con potencia de 0.5HP, velocidad de entrada del rotor de 1.665 RPM/mim y salida de la caja reductora de 30 RPM/mim. Lo cual es una ventaja pues permite ejecutar la prueba a una velocidad pequeña dentro de los rangos permitidos por la normativa y además mejora drásticamente el torque que a su vez se refleja en la fuerza de compresión para el ensayo. El nuevo motor reductor se instala de forma horizontal con orientación de  $90^\circ$  respecto a la estructura metálica de soporte, mediante la adición de una platina de hierro de 3mm de grosor y tamaño 15x15cm, soldada a los soportes horizontales de la misma estructura. Así mismo, se fija con tornillos el nuevo motor a dicha platina, mediante la sujeción con soportes metálicos en forma de "L" de igual espesor, soldados al ángulo de soporte de la base superior de la máquina y la platina.

Las figuras 16 y 17 ilustran el motorreductor y su montaje en la MUE.



*Figura 16. Motorreductor.*



*Figura 17. Instalación.*

La conexión está especificada con la entrada al motor de las 3 líneas de potencia provenientes del variador de velocidad, de acuerdo con la figura siguiente. [55]

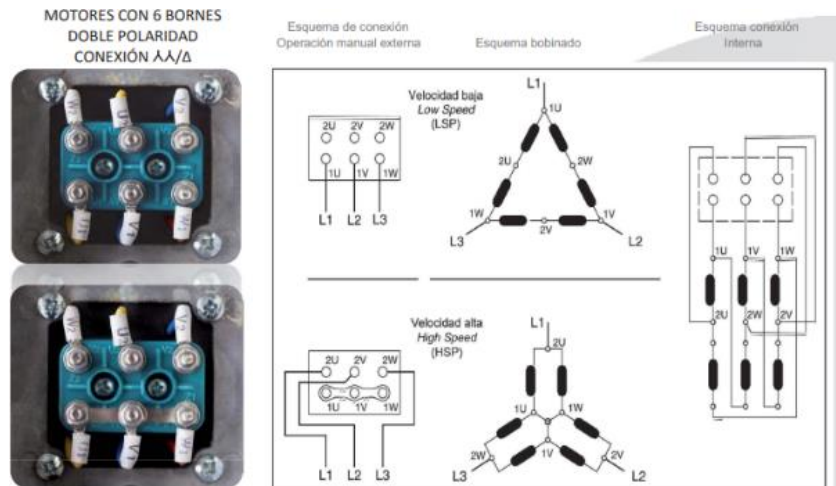


Figura 18. Diagrama de conexión en el tablero del motorreductor [55].

### 2.4.3 Celda de carga

La celda de carga original instalada en la máquina posee un rango de medición de 0-30Kg de capacidad, dejando por fuera datos de medición que superen los 30kg, por esta razón, se decide ampliar el rango de medición, con la instalación de una nueva celda de carga de 0-40Kg, con el propósito de lograr censar la fuerza aplicada a aquellas probetas con mayor densidad de material PLA, las cuales superan levemente los 30Kg de fuerza.

La nueva celda de carga instalada es de referencia Lexus modelo SP06 [56], single point para plataformas de una sola celda, clase C3, tiene las siguientes características: sensibilidad de 1.8mV/V, protección IP65, fabricada en aluminio, impedancias características: 400 ohm entrada y 352 ohm salida para tamaño máximo de plataforma 30 x 30 cm. Y además no necesita de una adecuación respecto a la estructura original de máquina, pues posee las mismas dimensiones que la celda predecesora. En las figuras 19 y 20 se muestra la nueva celda de carga y su instalación en la base de soporte.



Figura 19. Celda de carga

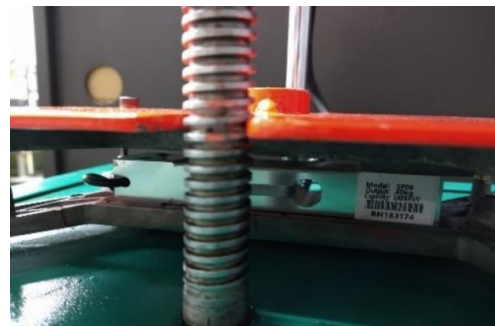


Figura 20. Instalación.

Este sensor cuenta con una entrada eléctrica de cuatro hilos, se utiliza un cable apantallado de sección transversal de 1mm, de colores rojo (+), Negro (-), verde (+) y Blanco (-), conforme a la figura 21 de Conexión de la celda de carga sugerida por el fabricante.

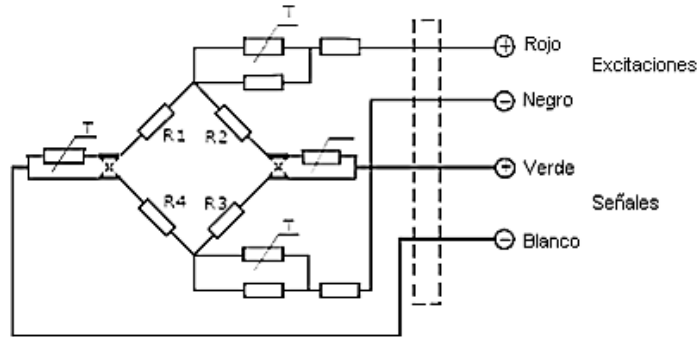


Figura 21. Diagrama de conexión eléctrico de la celda de carga[56].

Los hilos referenciados se conectan al módulo DVP02LC, este dispositivo permite conectar y tomar lectura de hasta dos celdas de carga tipo analógicas, dicho modulo se ubica en el panel de control de la MUE junto a la conexión de riel DIN del PLC Delta, de acuerdo con el diagrama mostrado en la siguiente figura. Conexión al Modulo DVP02LC, Manual Módulo de operación [65],

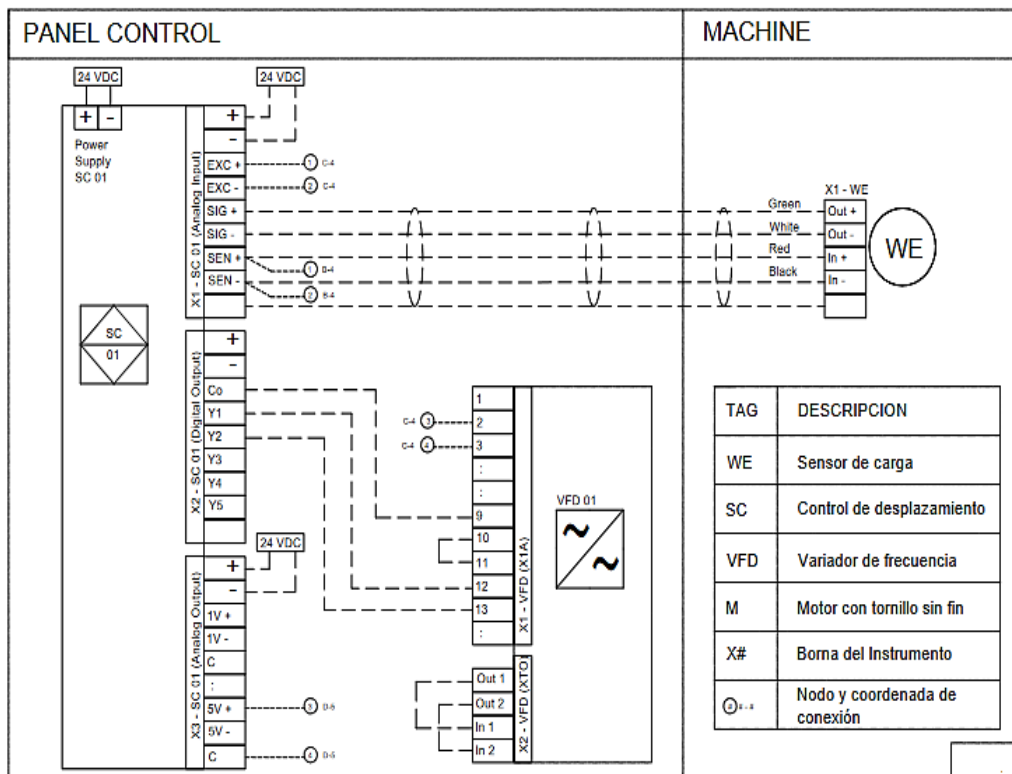


Figura 22. Conexión del Módulo DVP02LC. [65]

#### 2.4.4 Finales de carrera

Otra de las necesidades de mejora sobre la MUE, consiste en detener el motor reductor cuando las mordazas o cabezal móvil han realizado el recorrido completo hasta chocar con las platinas de base y barra superior del tornillo sinfín, justamente cuando se comprime o descomprime un material.

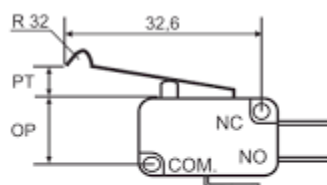
Por lo anterior, se instalan sensores finales de carrera LIGUAG de la serie SW-604, Power: 10<sup>a</sup> 125/250VAC Micro Switch final de carrera con palanca grande., ubicados en la parte superior e inferior del cabezal movible, accionándose de forma mecánica, enviando señales que cambian el estado del circuito, internamente contiene dos interruptores normalmente abiertos (NA) y cerrado (NC) [57]. Estos interruptores son aplicados principalmente en una amplia variedad de componentes electrónicos como los equipos para mecanización, equipos automatizados e instrumentación. En las figuras siguientes 23 y 24 se muestra el final de carrera y su instalación, mientras que en la figura 25 se observa su diagrama de conexión.



Figura 23. Final de carrera [57]



Figura 24. Instalación



OP (mm)	18.7 ±0.5
PT (mm)	3.3

Figura 25. Diagrama de conexión eléctrica del final de carrera [57]

En los finales de carrera superior e inferior, el hilo común se conecta al terminal (+) positivo de la fuente del PLC, y los cables tanto del final de carrera superior como

del inferior se conectan a los puertos X1 y X0 respectivamente en el PLC DVP28SV, para ser leídos como un cambio en la entrada.

#### 2.4.5 Encoder

Para realizar el diagrama de esfuerzo-deformación real, se relaciona la fuerza y la deformación en cada punto de la superficie lineal de la probeta.

Teniendo en cuenta que el esfuerzo es calculado mediante la información brindada por la celda de carga, es necesario calcular la deformación en todo momento del ensayo, para tal efecto, se instala un Encoder tipo PON-6--20140401-7788 600PR, [58] con especificaciones: Pulsos: 600 p/r (Monofásico 600 pulsos /R) Fuente de alimentación: DC5-24V Eje: 6\*13mm/0.23\*0.51" Tamaño: 38\*35.5mm/1.49\*1.39" Salida: AB de 2 fases rectangular circuito de pulso ortogonal, la salida para el tipo de salida de colector abierto NPN velocidad mecánica máxima medida de 5000 RPM/min y Frecuencia de respuesta: 0-20kHz.

Este dispositivo se usa para medir directamente la posición angular, la velocidad de angular, y calcular indirectamente la posición vertical de compresión, es decir, convertir el movimiento del eje (tornillo sin fin), en una señal eléctrica de pulsos que es leída por el Controlador Lógico Programable PLC. Lo anterior nos permite encontrar la cantidad de pulsos correspondientes a cada milímetro de desplazamiento del cabezal móvil que aplasta la probeta, configurándose una velocidad de carga en mm/s, censándose los datos en una tabla para ser graficados. En las figuras 20 y 21 se muestra el Encoder y su instalación.



Figura 26. Encoder



Figura 27. Instalación del Encoder.

El Encoder cuenta con cuatro hilos de conexión eléctrica, se utiliza un cable apantallado de sección de 1 mm<sup>2</sup>, de colores Verde = fase A, blanco = fase B, rojo = potencia Vcc +, negro = V0, conforme con la figura 28 de Conexión del Encoder dada por el fabricante.

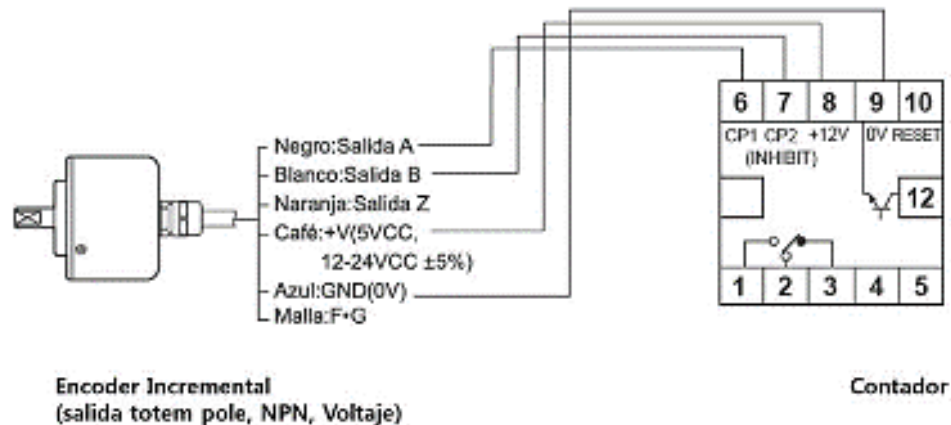


Figura 28. Diagrama de conexión eléctrica del encoder [58]

Los hilos se conectan al módulo DVP-06XA de entradas y salidas analógicas de la familia del PLC Delta, localizado este driver en el panel de control de la MUE, de la siguiente manera: los hilos rojos y amarillos al CH1 V+ e I+ respectivamente, COM libre y los hilos negro y verde al CH2 V+ e I+ respectivamente, tal como se muestra en la figura siguiente:



Figura 29. Conexión del encoder al módulo DVP-06XA.

## 2.4.6 Probetas de PLA

- Diseño

La construcción de las probetas cilíndricas se realizó cumpliendo con el estándar referenciado en la norma ASTM D695 [47] así: la primera versión con dimensiones de: 12,7cm por 12,7cm por 25,4 mm (0,50 por 0,50 por 1 pulgadas), la segunda con 12,7 por 12,7 por 50,8 mm (0,50 por 0,50 por 2 pulgadas).

Las probetas se diseñan con el software SOLIDWORKS 2020 [59] versión para estudiantes, utilizado en CAD 3D para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos 2D, a continuación se fabrican en la impresora 3D DREMEL 3D20, [60] Manual de usuario, su programa interno para archivos G3Drem, donde se genera el código G con la orientación y disposición del objeto previamente guardado en la memoria USB.

En las Figuras 30 y 31 se muestra la impresora utilizada y el material filamento amarillo PLA empleado.

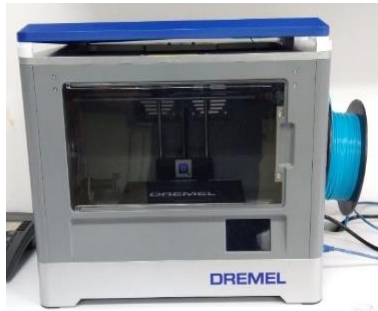


Figura 30. Impresora DREMEL.



Figura 31. Filamento PLA amarillo[61]

- Impresión

Se imprimen con filamento amarillo PLA [61], la cantidad de 20 probetas de dos tamaños, se emplea un espesor de capa de 0.2mm y un ancho de pared de 0.8 mm, impresos con patrón GRID de líneas paralelas en la primera capa y en la segunda capa igualmente líneas paralelas con dirección transversal, con un ángulo de trama de 0-90°, [62] y densidad de relleno de 10% y 15%, por la limitante de la plataforma existente de la MUE, que solo admite tamaños de celdas de carga hasta 40 Kg de capacidad.

En las figuras 32 y 33 se muestra los tamaños de las probetas (12.7mm de diámetro por 25.4 mm de alto y 12.7 mm de diámetro por 25.4 mm) y la su diseñada respectivamente.

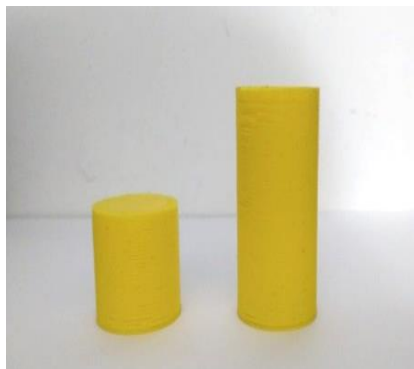




Figura 32. Tamaños probeta.

Figura 33. Geometría de enjambre probeta.

### 2.4.7 Cable de programación PLC-PC

El cable a utilizar para la programación del PLC con el PC es de referencia USB ACAB230, [63] con longitud de 2.5m para interfaz USB PLC, ver figura 34, con conector circular de 8 pines, y toma circular hembra, con salida USB conectado al sistema operativo WIN/(32/64Bit)/XP/vista.

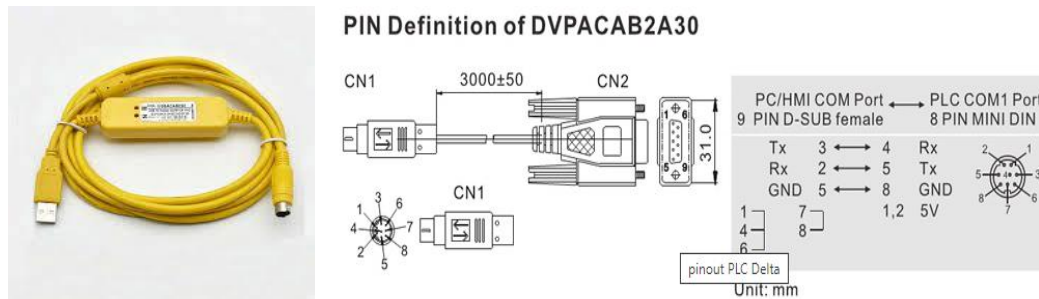


Figura 34. Cable conexión PLA [63].

### 2.4.8 Cable de comunicación RS-485 PLC-PC

El cable a utilizar para comunicación con el PLC con Chip o adaptador FTDI Cable USB a RS485 con TX/RX Leds 6ft A Adaptador de extremo de cable USB-RS485-WE [64] Ver Figuras 35 y 36, compatible Cable adaptador RS-485 con controlador, Soporte 12M de velocidad completa, señales compatibles con USB-RS485-WE-1800-BT, conductores Rojo-VCC(5v), negro-GND, blanco-Data +, verde-Data- Compatible con Android, compatible con Win 10, 8,8.1, Win 7, XP, 2000, Linux, Mac OS, Admite controlador FTDI VCP y controlador D2XX, Velocidad en baudios de 300 ~ 1mbps.



Figura 35. Adaptador USB [64]



Figura 36. Contactos cable comunicación [64]

### 2.4.9 PLC DVP02LC

En la tabla 12 se describen las características del PLC DVP02LC [65].

Tabla 12. Características PLC.

TIPO	DESCRIPCIÓN
Módulos Digitales (salida/entrada/mezcla):	8, 16, 32, 64 E/S
Módulos analógicos (salida/entrada/mezcla):	2 canales, 4 canales, 6 Entradas de canal (14 bits) /salida (12-
Célula de carga de módulos:	Módulo de celda de carga de alta precisión de alta velocidad de doble canal independiente con resolución de 24 bits con velocidad de respuesta de 2,5 ms.
Medición de temperatura módulos:	Tiempo de conversión 200 ms/canal general precisión +/- 0.6% Resolución 16 bits de IDT: Pt100/Pt1000 3850 PPM/°C (DIN 43760, JIS C1604-1989) /Ni100/Ni1000/LG-Ni1000/Cu100/Cu50 Termopar: J. K R. S tipo T
Módulos de red:	Ethernet DeviceNet, PROFIBUS-DP, CANopen RS-485, RS-422,BACnet,MS/TP,Módulos de comunicación e/s Remota: DeviceNet, PROFIBUS, Ethernet, RS-485.

A continuación, en la Figura 37 se ilustra el PLC DVP 02LC instalado en el panel de control de la MUE que incluye el módulo para lectura de la celda de carga.



Figura 37. PLC DVP 02ILC Delta.

#### 2.4.10 Módulo de expansión DVP-06XA de entradas y salidas analógicas

##### Descripción

1. El módulo de expansión de entradas y salidas analógicas DVP06XA [66] puede recibir 4 puntos de señales de entrada analógicas (voltaje o corriente) y convertirlas

en señales digitales de 12 bits. El módulo recibe 2 grupos de Datos Digitales de 12 bits desde la MPU PLC y los convierte en 2 puntos de señales analógicas para salida (en voltaje/corriente). Hay 49 registros de control (CR) de 16 bits en DVP06XA-S, y los datos en él se pueden leer y escribir usando instrucciones en el programa MPU del PLC de la serie DVP Slim.

2. La versión del sistema de DVP06XA se puede actualizar a través de la comunicación RS-485. La unidad de alimentación está separada y es de tamaño pequeño y fácil de instalar.

3. El usuario puede seleccionar la entrada de voltaje o corriente mediante cableado. Rango de voltaje de entrada:  $\pm 10\text{VDC}$  (Resolución: 5mV). Rango de entrada de corriente:  $\pm 20\text{mA}$  (Resolución: 20uA).

4. El usuario también puede seleccionar voltaje o salida de corriente mediante cableado. Rango de salida de voltaje: 0V ~ +10VDC (Resolución: 2.5mV). Rango de salida de corriente: 0mA ~ 20mA (Resolución: 5uA).

Las características del módulo DVP-06XA de entradas y salidas analógicas se presentan en la siguiente tabla 13 [66].

*Tabla 13. Características módulo de entradas y salidas.*

<b>TIPO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	
Analógico/digital mixto (A/D) Módulo	Entrada de voltaje	Entrada de corriente
Voltaje de la fuente de alimentación	24VDC (20,4vdc ~ 28,8vdc) (-15% ~ +20%)	
Canal de entrada analógico	4 canales por módulo	
Rango de entrada analógica	$\pm 10\text{V}$	$\pm 20\text{mA}$
Rango de datos digitales	$\pm 2.000$	$\pm 1.000$
Resolución	12 bits (1LSB= 5mV)	11 bits (1LSB= 20uA)
Impedancia de entrada	200K $\Omega$ Y arriba	250 $\Omega$
Precisión general	$\pm 0.5\%$ de escala completa de 25 °C (77 °F). $+1\%$ de escala completa durante 0 ~ 55 °C (32 ~ 131 °F).	

Tiempo de respuesta	3ms x canales	
Método de aislamiento	No hay aislamiento entre los canales	
Rango de entrada Absoluto	± 15V	± 32mA
Formato de datos digitales	2.Complemento de 16 bits (13 bits significativos).	
Función media	Sí (se puede configurar CR #2 ~ CR #5 y el rango es K1 ~ K4,095)	
Función de autodiagnóstico autodetección	Detección de límite superior e inferior por canal	
Mezcla digital/analógica (D/A) Módulo	Salida de voltaje	Salida de corriente
Canales de salida de señal analógica	2 canales por módulo	
Rango de salida analógica	0 ~ 10V	0 ~ 20mA
Rango de datos digitales	0 ~ 4.000	0 ~ 4.000
Resolución	12 bits (1LSB= 2.5mV)	12 bits (1LSB= 5uA)
Impedancia de salida	0,5Ω o inferior	
Precisión general	±0.5% de escala completa de 25 °C (77 °F). ±1% de la escala completa durante 0 ~ 55 °C (32 ~ 131 °F)	
Tiempo de respuesta	3ms x canales	
Corriente de salida máxima	20mA (1KΩ~ 2MΩ)	/
Tolerancia con impedancia	/	0 ~ 500Ω
Formato de datos digitales	Complemento de 2 de 16 bits (13 bits significativos).	
Método de aislamiento	Aislamiento entre circuitos digitales y Analógicos. No hay aislamiento entre los canales.	

Protección	La salida de voltaje tiene protección contra cortocircuitos, pero el largo período de cortocircuito puede causar daños en el cableado interno y la rotura de la salida de corriente.
Modo de comunicación (RS-485)	Modo MODBUS ASCII/RTU. Tasa de baudios de comunicación de 4.800/9.600/19.200/38.400/57.600/115.200. Para el modo ASCII, el formato de fecha es de 7 bits, incluso, 1 bit de parada (7, E, 1). Para el modo RTU, el formato de fecha es de 8 bits, incluso, 1 bit de parada (8, E, 1). El RS-485 está desactivado cuando el DVP06XA-S está conectado en serie con MPU.
Conectar a DVP-PLC MPU En serie	Cuando DVP06XA-S módulos están conectados a una MPU, los módulos están numerados del 0-7. 0 es el más cercano a la MPU y 7 es el más. El número máximo de módulos es de 8 módulos y no ocupan ningún punto de E/S digital de la MPU.
Fuente de alimentación	
Consumo máximo de energía	2W a 24VDC (20,4vdc ~ 28,8vdc) (-15% ~ +20%), suministrado por energía externa
Medio ambiente	
Operación/Almacenamiento	Funcionamiento: 0 °C ~ 55 °C (temperatura); 50 ~ 95% (humedad); Grado de contaminación 2. Almacenamiento: -25 °C ~ 70 °C (temperatura); 5 ~ 95% (humedad).
Inmunidad a la vibración/choque	Estándares internacionales: IEC 61131-2, IEC 68-2-6 (prueba Fc) /IEC 61131-2 e IEC 68-2-27 (Prueba Ea)

A continuación, se ilustra el módulo de expansión del PLC.



*Figura 38. Módulo de expansión DVP-06XA Delta.*

## **2.5 MUE Torcopren's instrumentado versión original**

En las figuras 39 y 40 se presenta la MUE Torcopren's, debidamente instrumentada con los componentes originales mecánicos, de hardware y de medición para su automatización y programación del proceso de supervisión y monitoreo del proceso de compresión uniaxial sobre PLA, es de aclarar que esta versión no era funcional.



*Figura 39. MUE instrumentado original.*



*Figura 40. Panel de control MUE original.*

### **3 CAPITULO: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO**

En este capítulo se realizan las etapas de ingeniería básica, al igual que la etapa de ingeniería de detalle, necesarias para obtener el diseño y propuesta del sistema de monitoreo y supervisión, sobre la nueva MUE Torcopren's instrumentada y completamente funcional (ver figura 41) igualmente se presentan todos los planos y manuales de implementación.

#### **3.1 Diseño del sistema SCADA**

La MUE Torcopren's fue diseñada para realizar ensayos de compresión, sin embargo, carece de instrumentación adecuada, sin un sistema de supervisión y monitoreo para su operación en la compresión de materiales PLA y sin la correcta interacción humano máquina, no es de gran utilidad por ejemplo en laboratorios de fabricación digital 3D de hoy en día.

Una vez realizado el inventario, el diagnóstico y pruebas mecánicas preliminares, junto con las correcciones de instrumentación, sensores, actuadores y estructuras de soporte, se determinaron los requerimientos de elementos, hardware y software, los cuales fueron instalados en la máquina para alcanzar un modo de funcionamiento basado en escenario de automatización por PLC y un sistema de monitoreo mediante software robusto de talla industrial, con características más que suficientes para esta aplicación, además de modos de comunicación local entre el PLC y HMI (computadora).

##### **3.1.1 Arquitectura de automatización propuesta**

El diseño fue concebido teniendo como base la estructura metálica del sistema mecánico de compresión, como también del sistema de mando, sensores, actuadores, un Controlador Lógico Programable PLC, un módulo de entradas y salidas analógicas y un sistema eléctrico compuesto por una fuente de alimentación y disyuntores, montados en rieles en el gabinete metálico ubicado en la base de la máquina, entre otros.

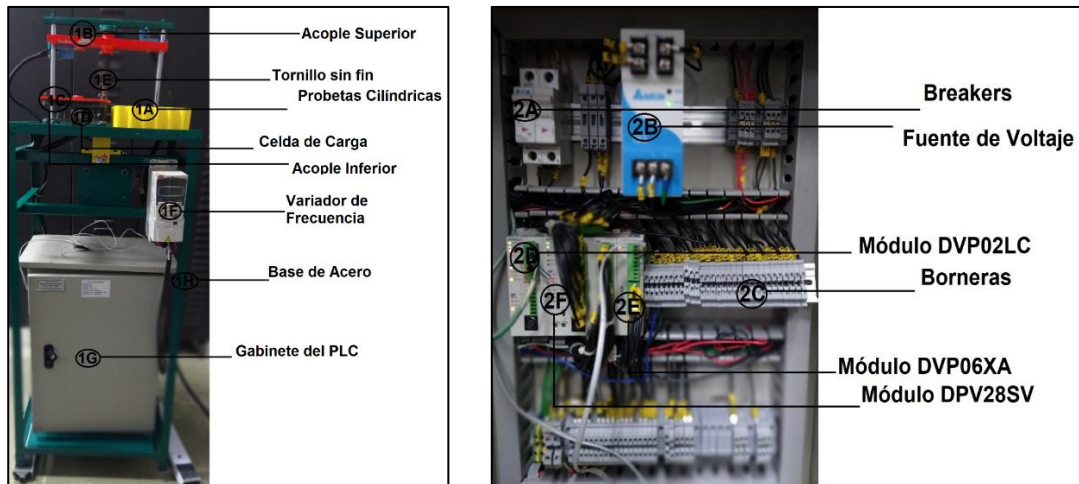


Figura 41. Nueva máquina Torcopren´s instrumentada, a la izquierda una vista general, a la derecha la vista desde el panel de control [5].

Dentro del procedimiento de actualización e implementación adicional, se instalaron los siguientes actuadores: el motorreductor Techtop y el variador ABB ACS355 con funciones de torque y control velocidad. Así mismo, se colocan sensores de carga con mayor capacidad de 40Kg, un Encoder para convertir el movimiento del eje (tornillo sin fin) en señal eléctrica de pulsos, sensores de final de carrera para control del movimiento del cabezal, todas estas señales son leídas por el Controlador Lógico Programable PLC. Para recibir señales de la celda de carga se instalaron los módulos DVP0LC y DVP-06XA de entradas y salidas para el Encoder.

Para la creación del sistema supervisión y monitoreo se utiliza el software DIAView, instalados en un PC marca Hewlett Packard (procesador Intel Core i7 7500U 2,7 GHz, con memoria estándar de 8GB), para su gestión y visualización gráfica de variables. Para la configuración del PLC se utilizan las herramientas de software ISPSOft en un lenguaje de programación Ladder estándar.

Al Controlador Lógico Programable PLC, le ingresan señales de sensores como:

- Finales de carrera que funcionan a 0-24V, con señales de tipo discreto.
- Encoder entrada analógica de 0-10V, con señal de pulsos digital.
- Celda de carga entrada 10 a 12V, con señal continua.

El PLC también procesa “salidas” digitales, para activación del Variador y del Motorreductor, al igual que algunas luces indicadoras. Además, este controlador se comunica con el sistema de supervisión y monitoreo alojado en DIAView, el envío de información se hace mediante el protocolo de comunicación RS-485 serial.

Por otra parte, desde el PC es posible ingresar datos, como es el caso de la longitud inicial de la probeta, también se puede graficar las curvas de compresión y al



finalizar el ensayo exportar los datos en una tabla de información. En la figura 42 se observa la arquitectura planteada de interacción entre los componentes de la máquina.

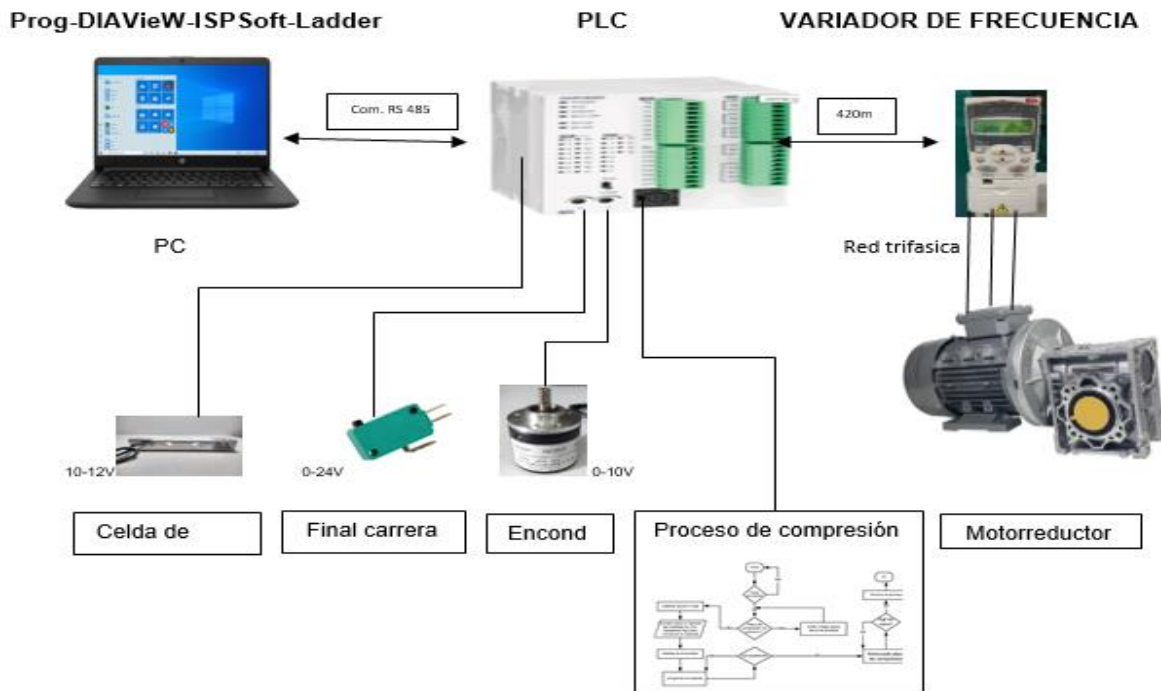


Figura 42. Arquitectura propuesta para el funcionamiento de la nueva máquina Torcopren's

### 3.1.2 Caracterización de sensores

La caracterización es el procedimiento para encontrar una relación matemática entre los datos de fuerza que arroja la maquina provenientes del sensor, contrastados con datos reales de un elemento de medición de fuerza externo, exactamente la caracterización busca calcular la ecuación característica del comportamiento del sensor.

#### Caracterización del sensor celda de carga

Los objetos usados para la experimentación y toma de mediciones se muestra en la figura 43. El experimento se realiza al ubicar un peso combinado entre cada ensayo ascendente, mediante dos pesas de 0.5Kg, dos pesas de 10Kg, dos pesas de 5Kg; dos pesas de 4Kg y una de 2.25Kg, con un total de 40.25Kg sobre el sensor de carga de la MUE Torcopren's, a continuación, se mide el voltaje resultante al incrementar el peso sobre el sensor, mediante la lectura directa del voltaje analógico desde el PLC enviado en cada ensayo de pesos, enseguida estos datos se grafican en Matlab.



Figura 43. Pesos estándar para la caracterización del sensor.

Como resultado se obtiene un vector de fuerza con 41 datos, que corresponden a la variación de la fuerza aplicada sobre el sensor con rango entre 0 y 40 kg, y 41 mediciones de voltaje, correspondientes a la variación de la fuerza entre 0 y 4.6 Volts. Se emplea, una técnica de regresión lineal de fuerza y voltaje medida, que permitirá establecer la relación de dependencia entre ellas, donde Y es la fuerza y X es el diferencial de potencia, P1 es la pendiente de la línea recta y P2 el intercepto con el eje vertical.

$$Y = P1X + P2$$

Los datos de fuerza/voltaje, obtenidos durante las experimentaciones, se procesan mediante un archivo.Mat propio de Matlab, los cuales son organizados y procesados en formato vectorial. Las variables Fuerza y Voltajes, almacenan las muestras tomadas, a continuación, con la función “polyfit()” se crea un polinomio P, de grado N que se ajuste mejor a los datos (Voltajes (X) y Fuerza (Y)).

A continuación, se evalúa si el polinomio hallado, se ajusta a los datos, para ello se emplea la función “polival()”.

En la figura 44, se presenta la regresión lineal entre el cambio de voltaje (x) del sensor, y la fuerza aplicada (Y). Igualmente se puede observar el polinomio encontrado:

$$y= 0.5007*X+809.8$$

representado como una línea roja (linear), y el coeficiente de correlación (P=0.9983) o ajuste entre los datos reales y la ecuación arrojada por Matlab, con los resultados obtenidos se puede concluir que, existe una fuerte asociación lineal positiva entre el cambio de voltaje con respecto a la fuerza medida por sensor de carga, permitiendo detectar variaciones de voltaje entre 0 y 6.5539 como palabra digital que representa el voltaje leído por el módulo convertidor analógico digital del PLC.

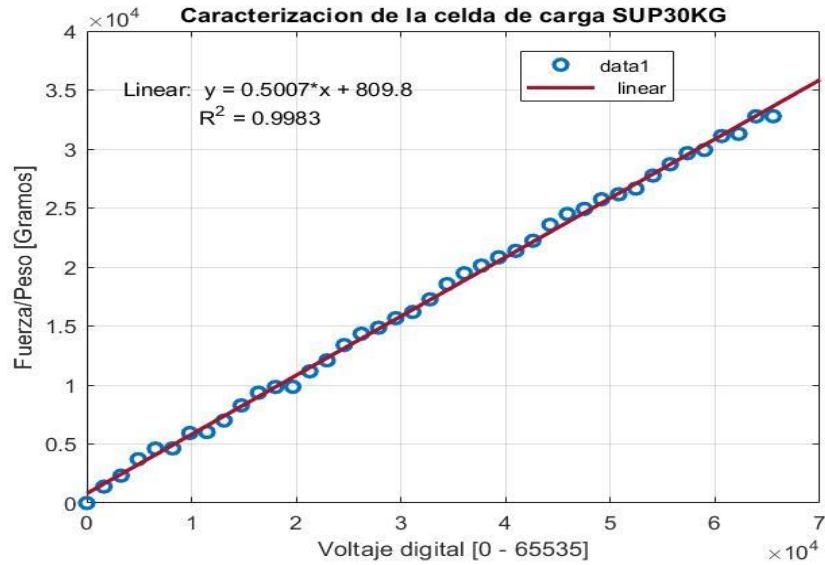


Figura 44. Regresión lineal entre las variables fuerza/ peso versus voltaje.

### Caracterización del sensor Encoder

El encoder es un dispositivo que se encuentra acoplado mecánicamente al eje del tornillo sinfín que comprime el cabezal móvil, el cual convierte el movimiento rotacional en pulsos de voltaje discretos a manera de una señal cuadrada, los cuales son capturados por el PLC mediante un algoritmo de medición de tiempos y secuencia, que finalmente los transforma en porciones de giro por unidad de tiempo. Adicionalmente se usa una relación matemática de la cantidad de giros del encoder respecto al desplazamiento vertical del cabezal móvil de compresión, lo cual permite medir el desplazamiento en milímetros durante la prueba.

Para determinar la relación matemática de compresión lineal de la probeta versus la cantidad de giros, se realiza una serie de pruebas en las que se gira el tornillo sinfín accionando lentamente el motor y contando la cantidad de giros, pero al mismo tiempo la distancia en milímetros de descende el cabezal móvil de compresión.

El lector debe recordar que es necesario medir el desplazamiento vertical en el ensayo de compresión, puesto que la curva de fuerza-deformación es ascendente en la medida que se comprime, hasta el punto en que el material no resiste y falla. La curva graficada, tiene una pendiente “M” que se calcula como un “delta”

$$Delta = \frac{F_2 - F_1}{X_2 - X_1}$$

También se debe recordar que la relación anterior es lo que se denomina módulo de Young o de elasticidad [46].

Por tanto, para determinar la longitud que se comprime la probeta, es necesario conocer la relación de cuantos milímetros desciende el cabezal móvil o platina móvil por vuelta del tornillo sinfín, entonces se realiza la caracterización, que consiste para este sensor encoder en marcar el eje y la base de la platina, activamos el motorreductor y cada vez que da una vuelta, se mide con un “Pie de Rey” cuántos milímetros baja la platina que genera el peso sobre la probeta, y así ascendente, hasta lograr la medición de 10 vueltas. También podemos lograr la proporción mediante una regla de tres para obtener cualquier valor de desplazamiento vertical frente una cantidad de giros del tornillo sinfín. La relación que describe el comportamiento:

La constante  $c=101.5$  es la pendiente que relaciona el desplazamiento longitudinal del tornillo sin fin con respecto a la rotación de este.

$$Y_{(mm)} = \frac{101,5 * X(vueltas)}{10 vueltas}$$

Donde se ilustra el procedimiento en la siguiente figura.

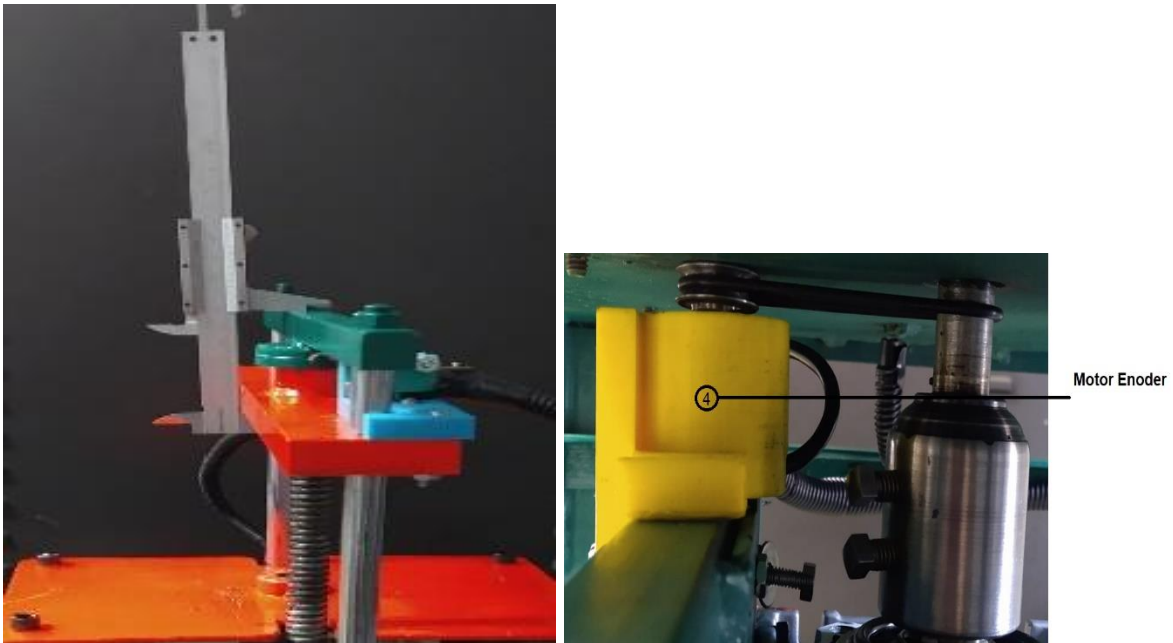


Figura 45. Medición con Pie de Rey del desplazamiento vertical del cabezal móvil.

Para lograr una mayor precisión en la medida, las vueltas son convertidas en grados, con la finalidad de lograr medir con exactitud la fracción de giro por unidad de desplazamiento. Si modificamos la anterior expresión esta se transformaría a:

$$Y(\text{mm}) = \frac{101,5 * X(\text{grados})}{3600(\text{grados})}$$

A continuación, se observa la cantidad de giros en unidades de grados versus la cantidad desplazada por el cabezal móvil de compresión.

*Tabla 14. Mediciones ajustadas del desplazamiento del cabezal movable en mm por vuelta y en grados del eje sinfín.*

<b>Vueltas eje</b>	<b>Grados</b>	<b>Long recorrida/mm</b>	<b>D_fija/mm</b>	<b>Longitud/mm</b>	<b>Prom_vuelta/mm</b>
1	360	65,32	61,3	4,02	4,02
2	720	69,34	61,3	8,04	4,02
3	1080	73,36	61,3	12,06	4,02
4	1440	77,38	61,3	16,08	4,02
5	1800	81,40	61,3	20,10	4,02
6	2160	85,42	61,3	24,12	4,02
7	2520	89,44	61,3	28,14	4,02
8	2880	93,46	61,3	32,16	4,02
9	3240	97,48	61,3	36,18	4,02
10	3600	101,50	61,3	40,20	4,02

D\_fija/mm: Corresponde a la Distancia fija entre la superficie superior de la barra fija hasta la superficie inferior del cabezal móvil del sistema de compresión, cuando estos están en posición de inicio, sin desplazamiento.

### **3.2 Unidad de control por PLC de la maquina Torcopren's**

#### **3.2.1 Controlador lógico programable PLC**

Este equipo instalado en la MUE Torcopren's, es un ordenador por microprocesador, donde las partes principales son: la CPU, el módulo de memorias, el módulo de entradas/salidas, la fuente de alimentación y la unidad de

programación. Para su funcionamiento es necesario que se realice una programación offline de la funcionalidad que se desea este ejecute, el comportamiento secuencial mediante ordenes de instrucciones que se le dará al PLC se traduce a lenguaje Ladder o lenguaje de escalera, propio de programación de todos los PLC's comerciales. Para tramitar esta serie de instrucciones de programa, se usa el software ISPSOft de la misma suite de controladores PLC Delta, el cual permite programar en instrucciones de escalera Ladder.

En general, la función que tiene un PLC es detectar diversos tipos de señales del proceso, en este caso los sensores de la máquina, y enviar acciones de acuerdo con el proceso de compresión de material PLA, en este caso la activación del motorreductor. Además, adopta diversas configuraciones de programación para brindar reportes del proceso, entre otras funcionalidades secundarias que son programadas.

Para mejor entendimiento del papel que desempeña el PLC, se ilustra en la figura 46 un esquema de relación entre las señales de entrada de proceso y señales de salidas de proceso, que obedece a los diferentes dispositivos y su Interfaz de operación con el PC y la máquina.

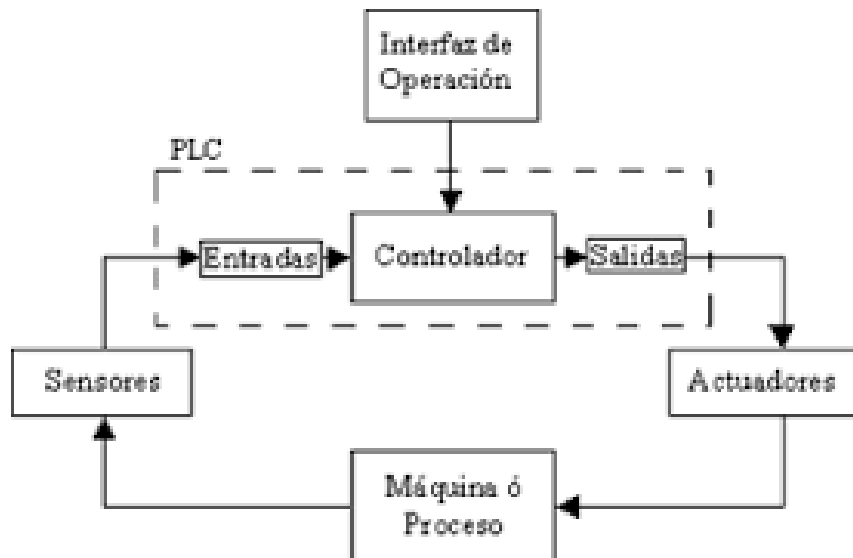


Figura 46. PLC, Planta y PC [67]

### 3.2.2 Características del PLC

El PLC DVP 28SV instalado en la MUE Tocopren's es de tipo: modular, compuesto por módulos expansibles aportando características de tipo industrial. Para este caso, su montaje se realiza sobre riel tipo DIN y conexión tipo rack, permitiendo la

interacción de la información entre sus diferentes módulos, con mayor velocidad de transmisión que optimiza su funcionamiento.

La tecnología de la marca DELTA referencia DVP 28SV [68] presenta las siguientes características:

- Salida de pulso de alta velocidad: 4 juegos de salida de pulso de 200 kHz.
- Soporta máx. 4 contadores de hardware de alta velocidad de 200 kHz.
- Aumenta muchas instrucciones de control de movimiento para cumplir con las aplicaciones que requieren posicionamiento de alta velocidad y precisión.
- Ofrece control de movimiento de interpolación lineal/de arco.
- Proporciona hasta 16 punteros de interrupción externos.
- Protección completa del programa.
- Función de copia de seguridad automática para evitar la pérdida de programas y datos incluso cuando se agota la batería.
- La función de segunda copia proporciona una copia de seguridad para un seguro adicional en caso de que se dañe un conjunto de programas y datos.
- La protección con contraseña de hasta 4 niveles protege sus programas fuente y su propiedad intelectual.
- Admite módulos del lado derecho e izquierdo de la serie DVP-S



Figura 47. PLC DVP28SV DELTA

### 3.2.3 Secuencia de operaciones del proceso de compresión

Previamente calibrados los sensores de medición, el proceso consiste en introducir una probeta cilíndrica de material PLA entre los acoples tipo mordaza de la MUE Torcopren's iniciando la prueba y habilitando el encendido del variador y motorreductor. Desplazando hacia abajo el cabezal móvil, el cual ejerce compresión siguiendo el régimen preestablecido, hasta que se deforma y/o rompe, quedando registrados todos los datos necesarios en las variables de la MUE.

Para un mejor entendimiento, en la figura 48, se observa el diagrama de flujo del proceso en el cual se presenta la secuencia y la interacción de las actividades del proceso compresión de material PLA, información que permitirá programar el PLC.

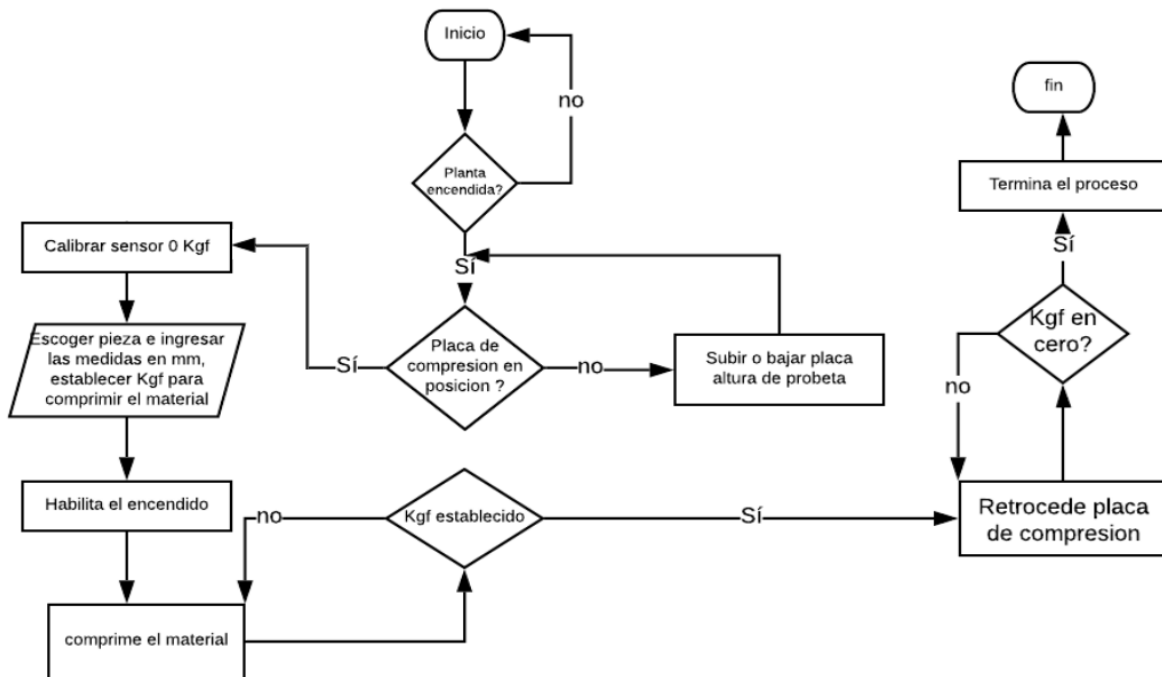


Figura 48. Diagrama de flujo del proceso de compresión

Establecido el flujo proceso, es necesario realizar la programación del PLC mediante la herramienta ISPSOft en lenguaje Ladder.

### 3.2.4 Programación del PLC

Para la automatización de la MUE Torcopren's, se incorpora dentro del controlador, una secuencia de operaciones del proceso de compresión de material PLA, las cuales van a ser determinadas con la configuración del equipo PLC de forma programada [69].

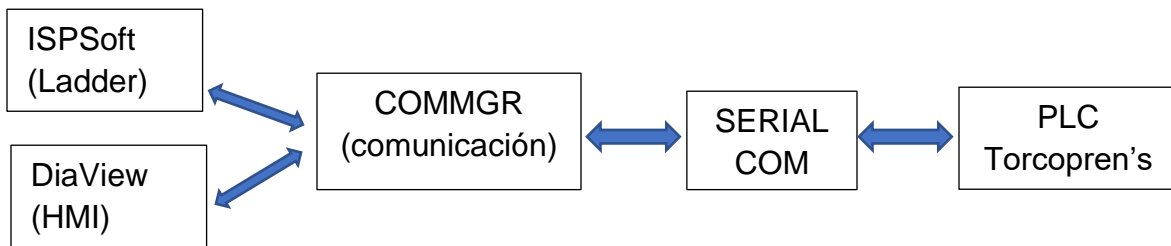
Para lo anterior, se utiliza el programa **ISPSOft** [70], la cual es una herramienta de desarrollo para Controladores Lógicos Programable de la marca DELTA. dentro de sus características soporta cinco lenguajes diferentes de programación entre ellos el más utilizado es Ladder, un programador gráfico lógico de contactos basado en los elementos eléctricos de control, muy importante para configurar las instrucciones aplicadas del proceso. (Para más información se puede consultar la norma IEC 61131-3, acerca de la estandarización de lenguajes de programación de PLC's, y sus instrucciones).



Como complemento, se utiliza la herramienta COMMGR (Administrador de Puerto COM), también propiedad de la suite DELTA, la cual es una plataforma de software que permite crear un puerto de comunicaciones común y local para enlazar una estación remota PLC, el computador, la maquina Torcopren's y la HMI (Interfaz Humano Maquina) para un proyecto completo de automatización de pequeña escala, esta última desarrollada en la herramienta DIAView SCADA.

### Protocolo de comunicación

A continuación, se detalla el diagrama de configuración del protocolo comunicación local propuesto para la maquina Torcopren's.



*Figura 49. Configuración protocolo de comunicación Torcopren's.*

### Procedimiento para establecer el enlace de comunicaciones

Inicialmente se debe abrir el software de programación Ladder, en la ventana crear del software ISPSOft se genera el proyecto Maquina de Compresión, se escoge el controlador PLC DVP y el tipo "SV" para luego iniciar su programación.

Enseguida abrir la herramienta "COMMGR", aquí se gestiona automáticamente todos los comandos de comunicación haciendo que el software de programación se conecte al hardware en este caso el PLC de la Torcopren's.

Para iniciar, se crean parámetros que se establecen en la lista del COMMGR llamados controladores que inician una conexión de diferentes protocolos posibles para esta suite, se ilustran en la figura siguiente algunos tipos de enlace.

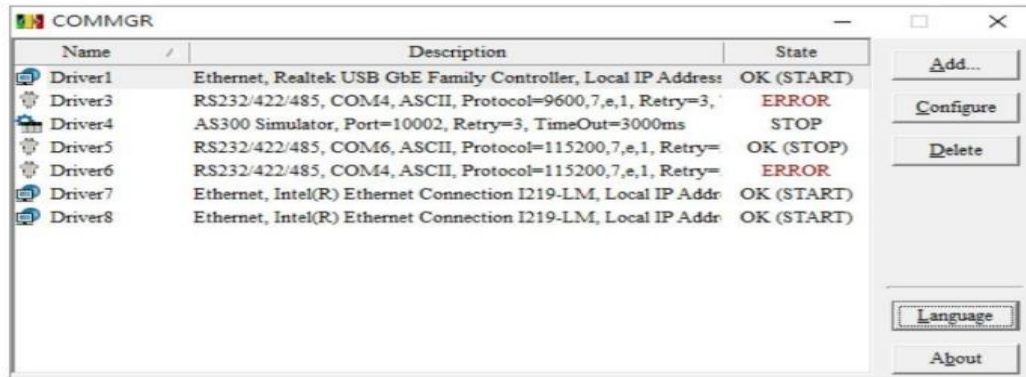


Figura 50. Controladores para protocolos del COMMGR

En la imagen anterior, las opciones de controladores a escoger se muestran en la columna “nombre”, igualmente los parámetros utilizados en la configuración de cada driver se muestran en la columna “Descripción” y su estado en ejecución, detenido o en error, se muestran en la columna de “estado”.

Para añadir un nuevo controlador de comunicación damos clic en el botón “Add” de la pantalla principal del software “COMMGR”, en la siguiente imagen se muestra la configuración serial usada en el proyecto Torcopren’s, se debe aclarar que el campo del recuadro azul dependerá de la asignación automática “COM” que el computador le haya otorgado al PLC.

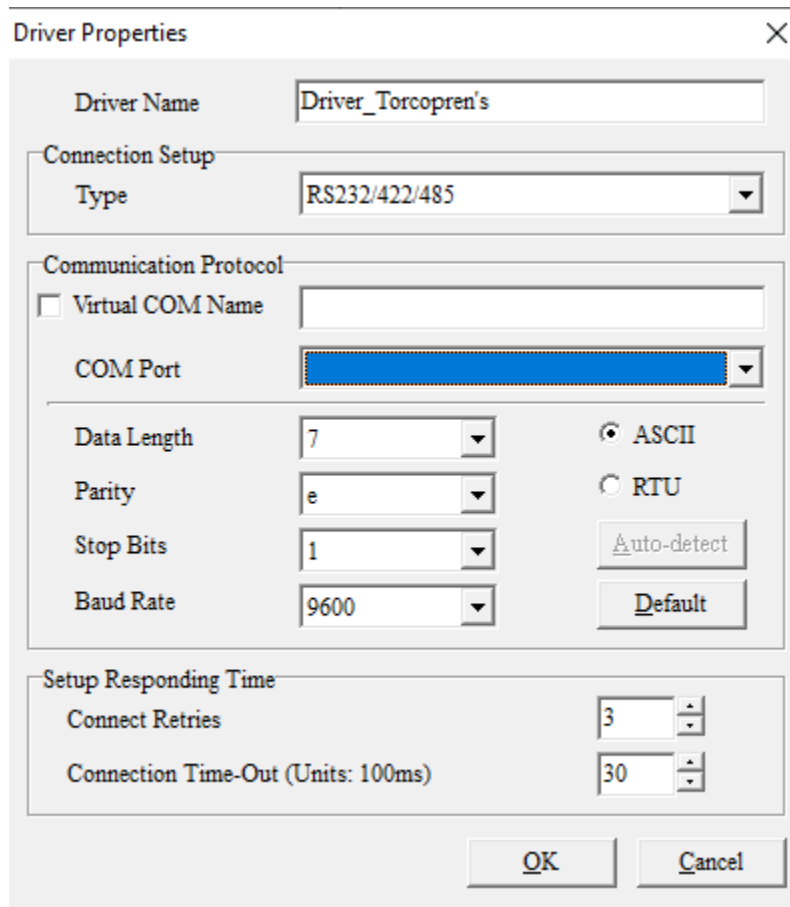


Figura 51. Ventana de creación del controlador de comunicación Torcopren's.

Enseguida damos clic en ok, observando que en la pantalla principal de la herramienta aparece nuestro controlador Torcopren's con el estado "START". Luego minimizamos la herramienta COMMGR, para continuar sobre la programación Ladder en ISPSOFT.

### Programación Ladder sobre ISPSOFT

A continuación, se procede a crear en el programa **ISPSOFT** el Proyecto Maquina de Compresión Torcopren's, se introducen los parámetros como "Tipo controlador" y "Tipo", estos hacen referencia al PLC que se está trabajando en este caso es el PLC delta DVP28SV, y la ruta donde se guardará el archivo.

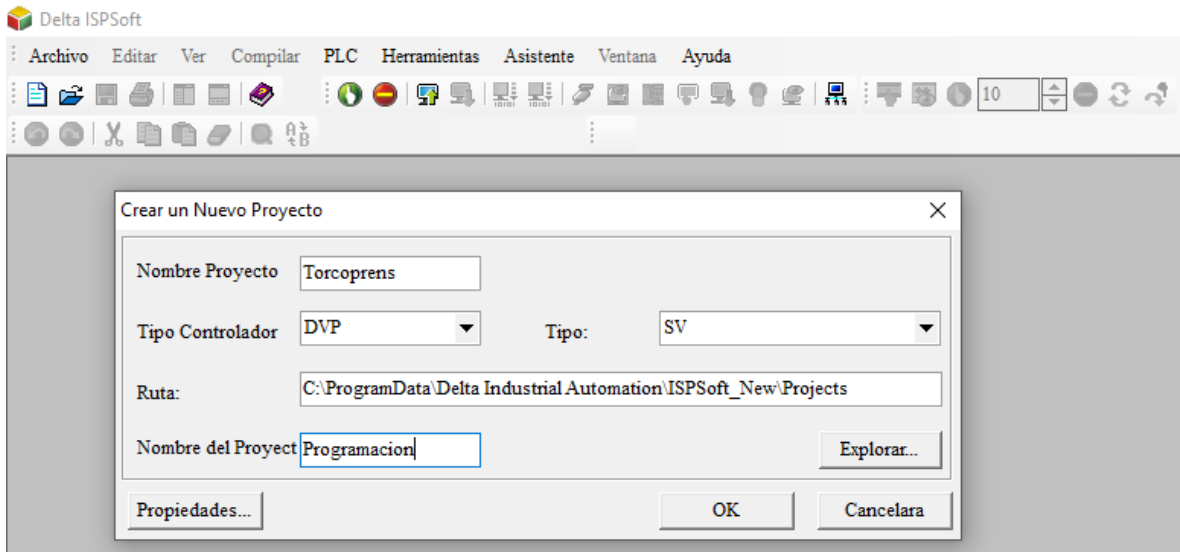


Figura 52. Creación del proyecto Torcopren's en ISPSoft.

A continuación, se crea un nuevo archivo de programación Ladder dando clic sobre la opción Programas, tal como se observa en la siguiente figura.

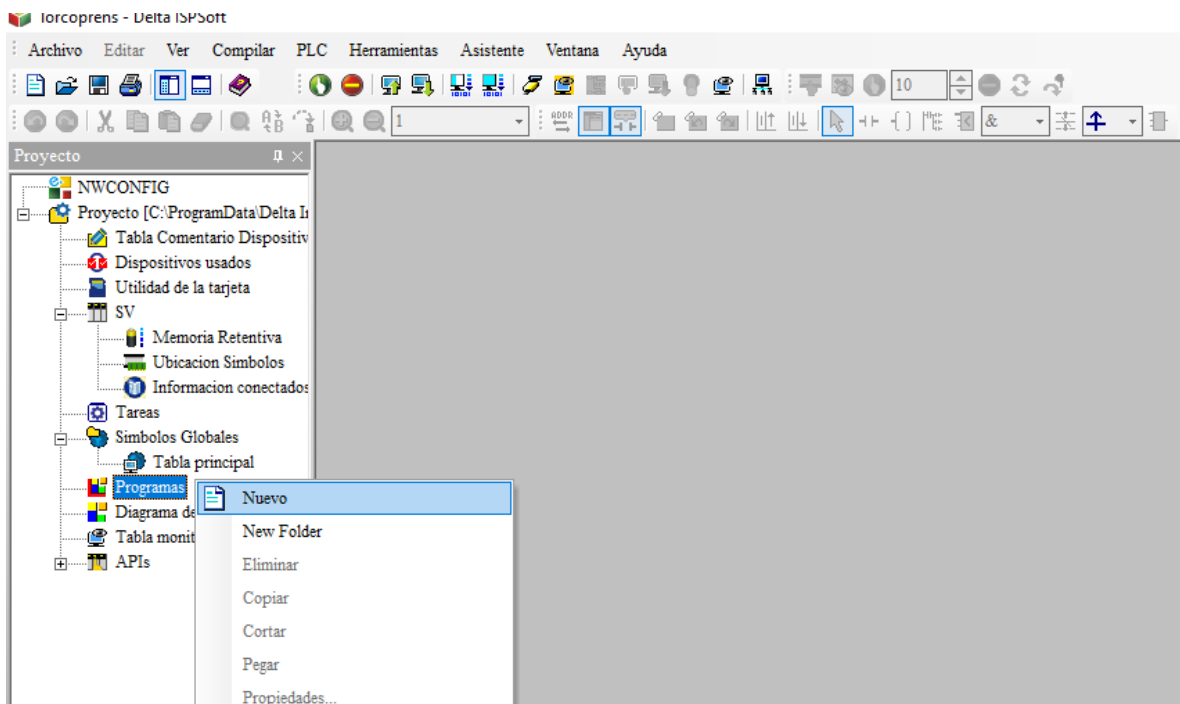


Figura 53. Creación de un archivo Ladder.

El lector debe recordar las siguientes consideraciones: la interpretación de un diagrama Ladder [71] o escalera, se realiza de izquierda a derecha y

generalmente de arriba hacia abajo. En cada rama se analiza la conexión de los elementos de entrada representados por contactores, y también los contactos de los elementos de control, finalmente si la lógica de contactos se cumple para cada rama esto energizará el elemento de carga o a su vez otro contacto de control.

A continuación, se describen de modo general los elementos más comunes, su simbología se aprecia en las figuras 54 y 55 [71].

- Contacto normalmente abierto (E1): si la variable asociada E1 vale '0', el contacto permanece abierto, y si vale '1' se cierra.
- Contacto normalmente cerrado (E2): si la variable asociada E1 vale '1', el contacto permanece abierto, y si vale '0' se cierra.
- Salida, bobina o relé (S1): la variable asociada S1 tomará el valor de la variable (o combinación de variables) que esté a su entrada (punto de conexión del lado izquierdo). También se puede enclavar o desenclavar, indicándolo con una S o R como se indica en los casos de S2 y S3.

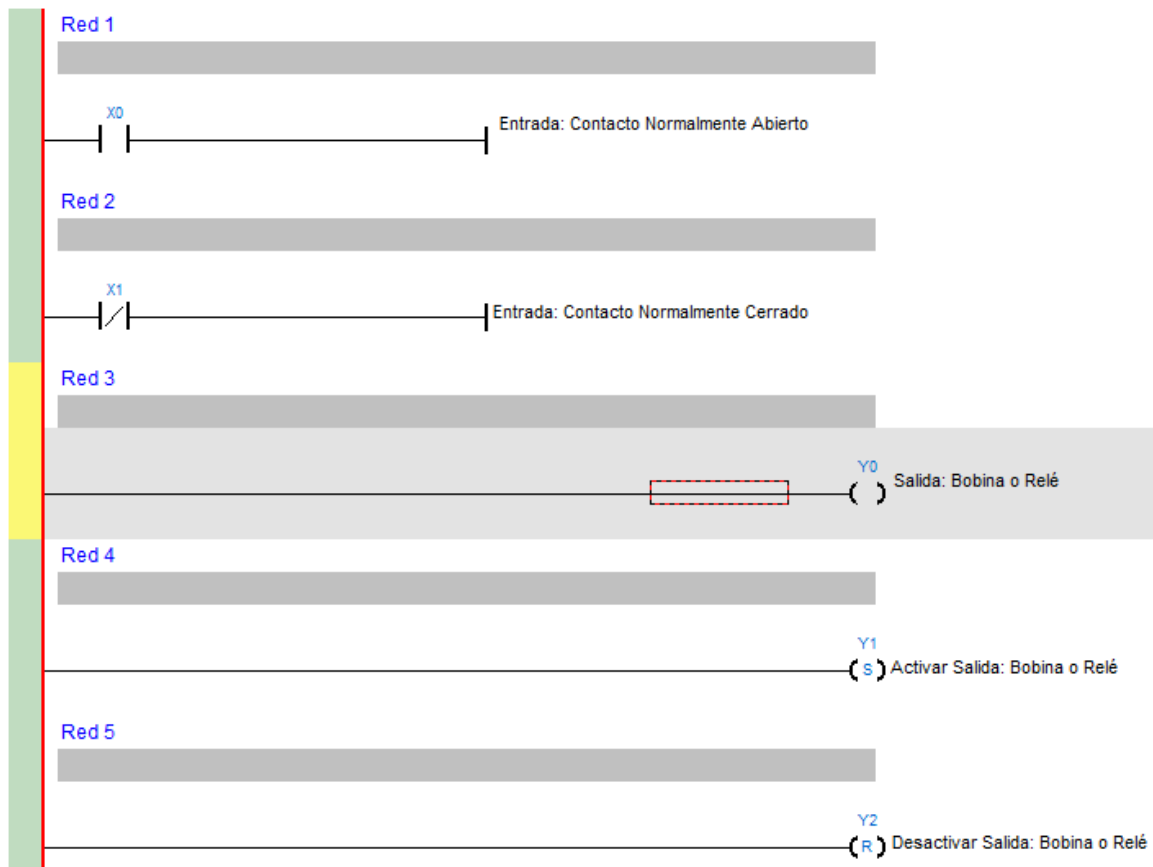


Figura 54. Contactos comunes del lenguaje Ladder.

## ETIQUETAS

Software: TiaPORTAL	APK: Ladder Simulator 2	NOMBRE
I	I	Entrada
Q	O	Salida
M	B	Marca   Memoria
T	T	Temporizador
C	C	Contador
S	-	Instrucción Set
R	-	Instrucción Reset

Figura 55. Etiquetas comunes del lenguaje Ladder [ 71].

En la ventana de trabajo en blanco del nuevo archivo de programación Ladder del software ISPSOFT, el usuario podrá construir toda la lógica de escalera, como se observa en la siguiente imagen de ejemplo.

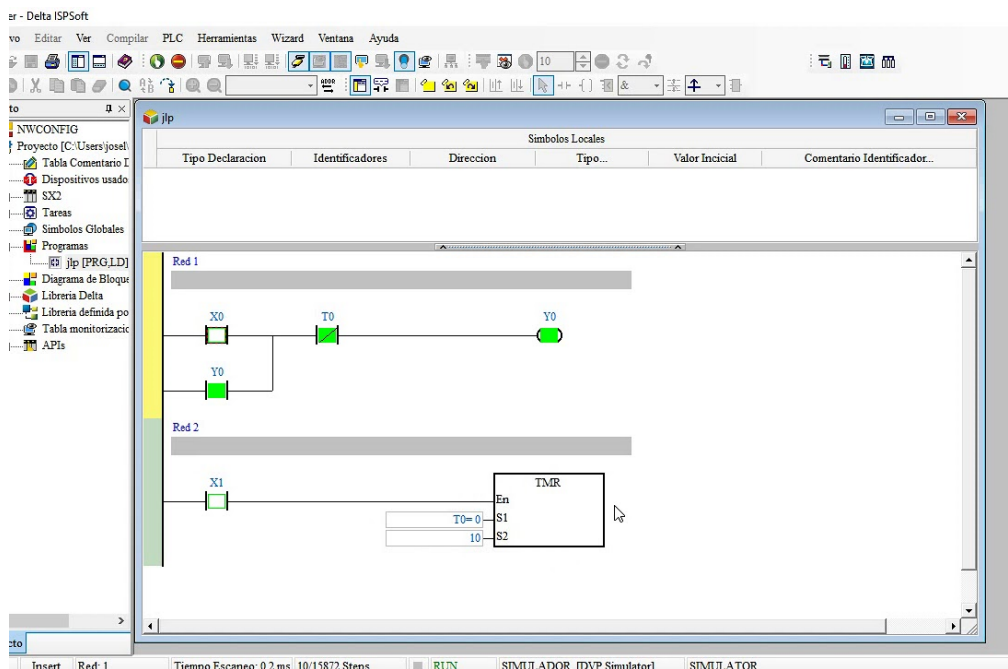


Figura 56. Espacio de trabajo de programación Ladder en ISPSOFT.

### Seudo código de funcionamiento de la maquina

En este apartado se presenta la descripción de alto nivel del principio de funcionamiento del algoritmo Ladder con el que se programa el PLC de la maquina Torcopren's. Se debe destacar que el siguiente diagrama nace a partir de la descripción del modelo proceso, modelo físico y modelo control procedimental, del capítulo "aplicación del estándar ISA88". La asignación de etiquetas a las variables de proceso es:

- SP: Etiqueta que representa el switch principal de encendido de la máquina.
- M: Etiqueta que representa el estado del motor.
- F1: Etiqueta que representa el final de carrera inferior.
- F2: Etiqueta que representa el final de carrera superior.
- B\_INI: Etiqueta que representa el botón de arranque de la prueba.
- B\_DAT: Etiqueta que representa el botón de exportar datos de la prueba.

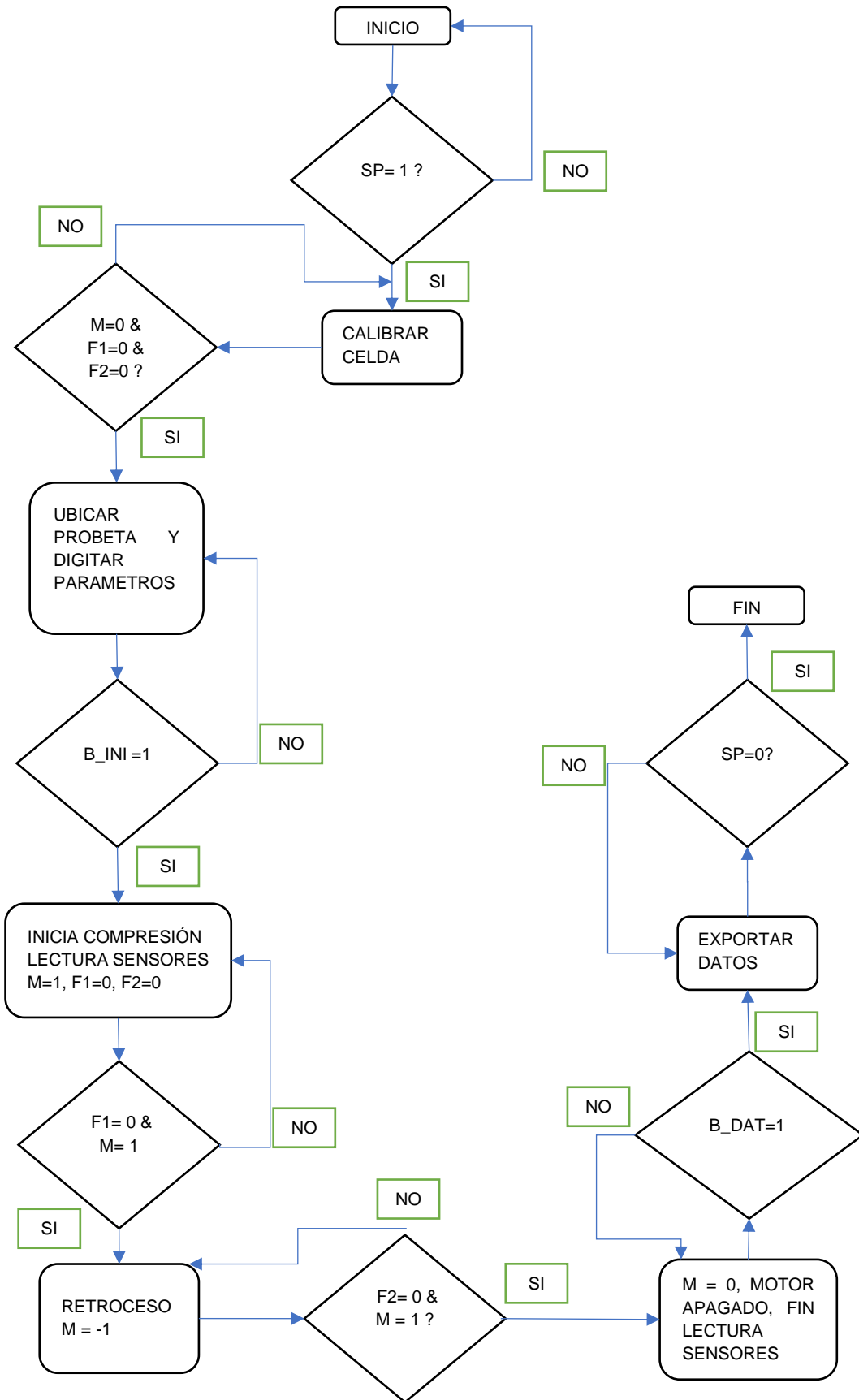




Figura 57. Seudocódigo de funcionamiento de la maquina Torcopren's

A continuación, se muestra por secciones la programación final de escalera para la maquina Torcopren's en la herramienta ISPSoft.

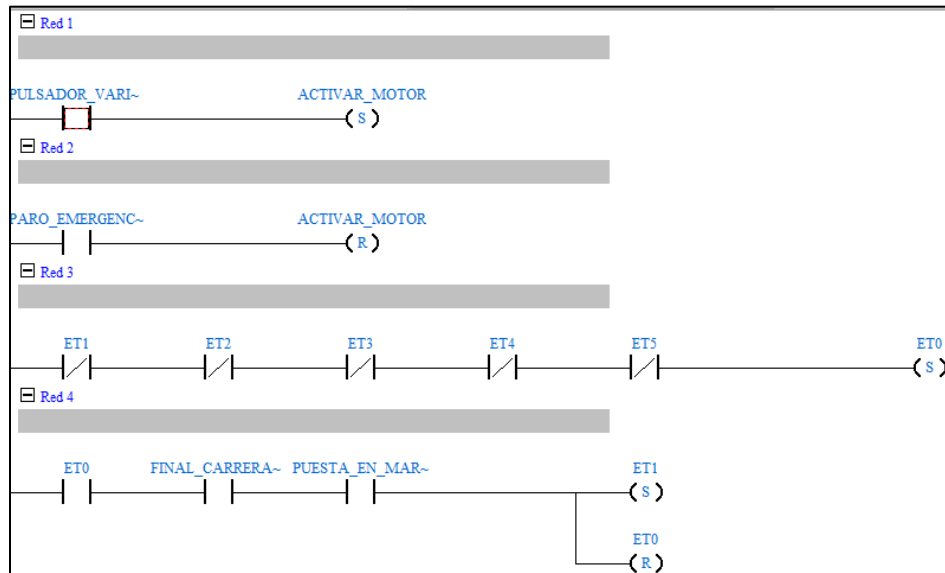


Figura 58. Red 1 a red 4 del archivo Ladder Torcopren's.

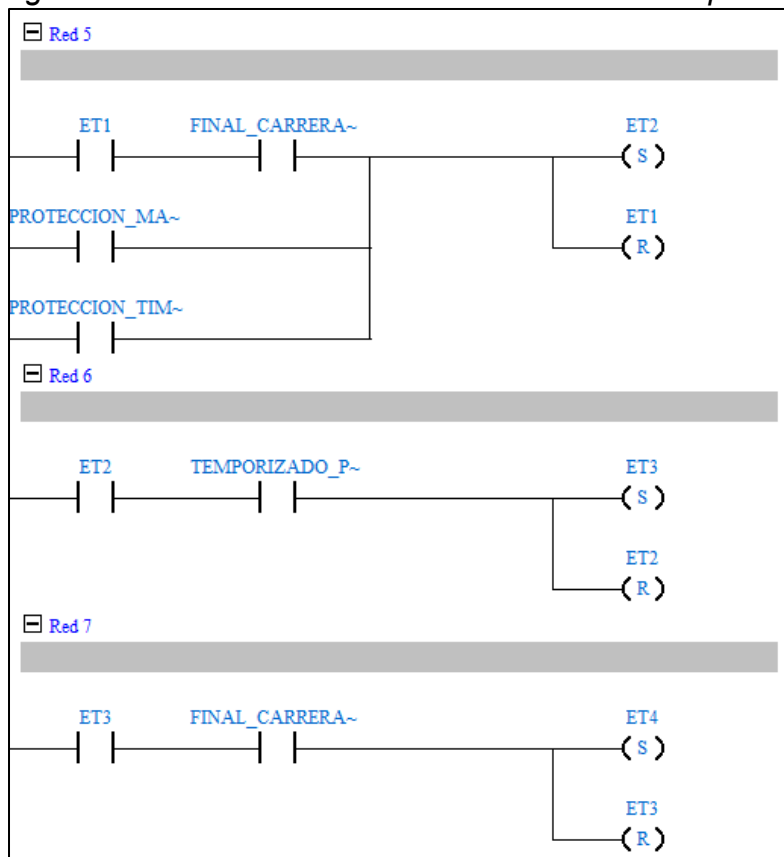


Figura 59. Red 5 a red 7 del archivo Ladder Torcopren's.

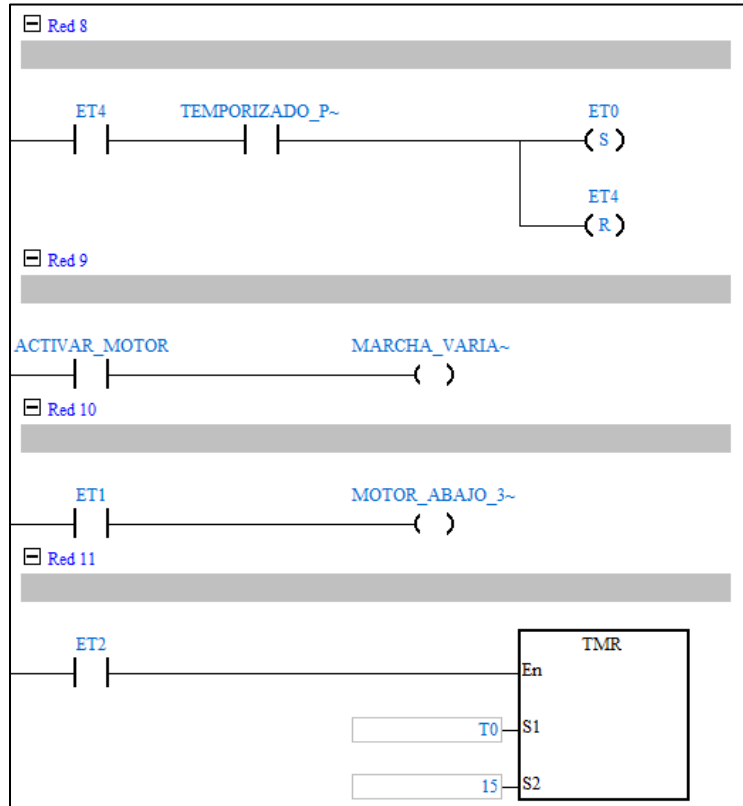


Figura 60. Red 8 a red 11 del archivo Ladder Torcopren's.

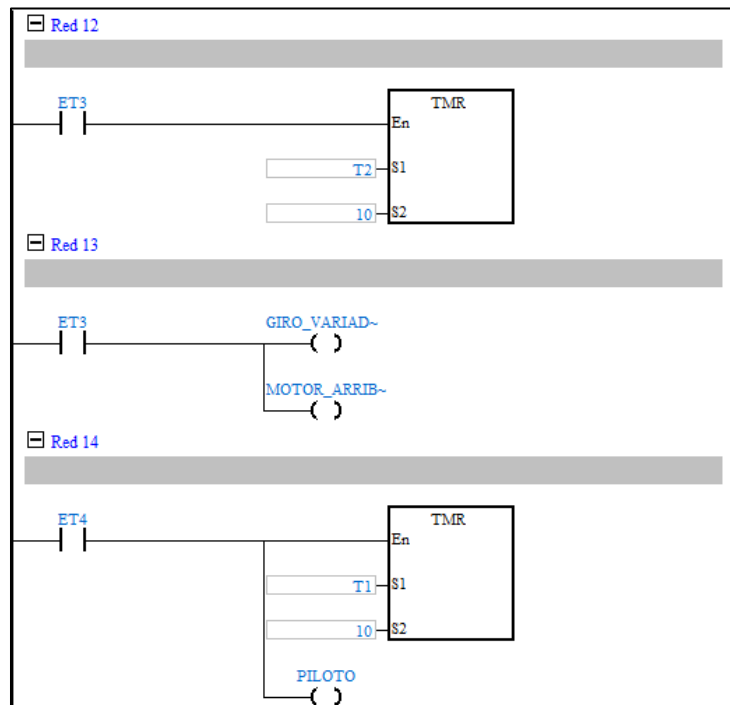


Figura 61. Red 12 a red 14 del archivo Ladder Torcopren's.

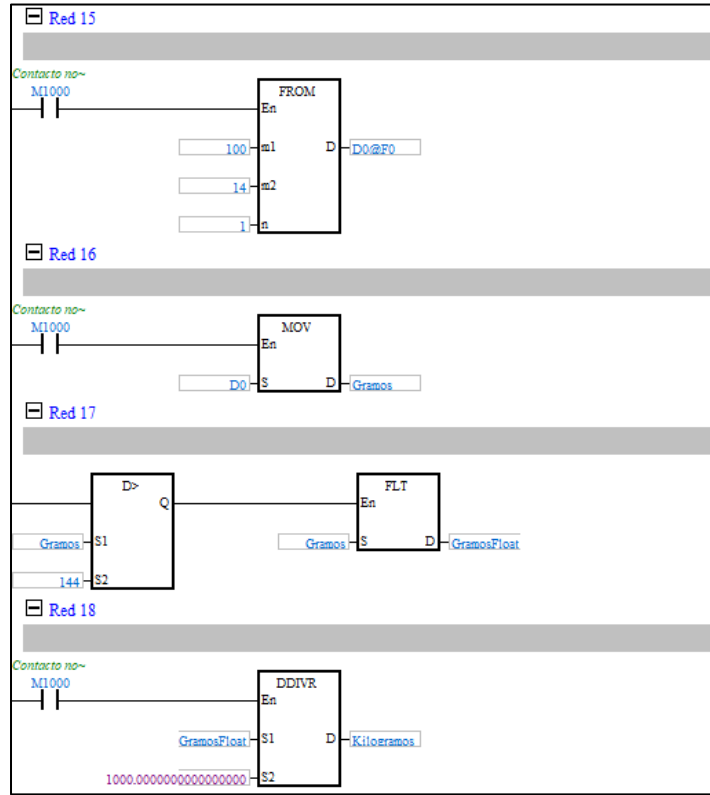


Figura 62. Red 15 a red 18 del archivo Ladder Torcopren's.

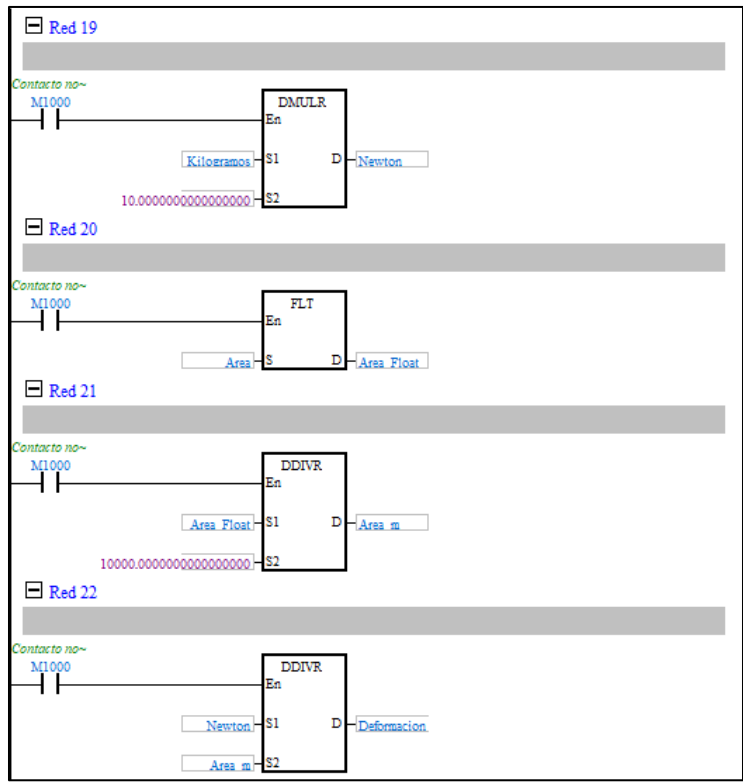


Figura 63. Red 19 a red 22 del archivo Ladder Torcopren's.

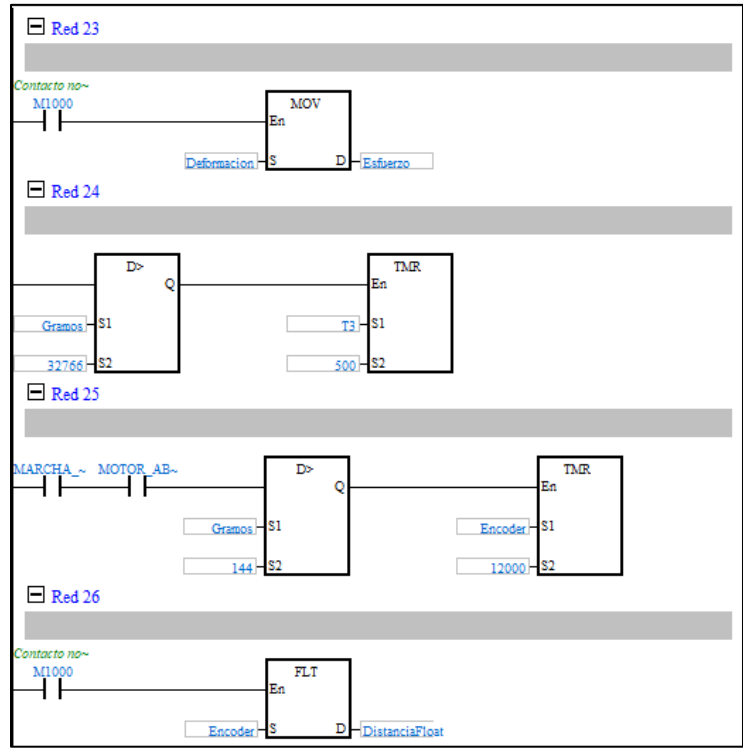


Figura 64. Red 23 a red 26 del archivo Ladder Torcopren's.

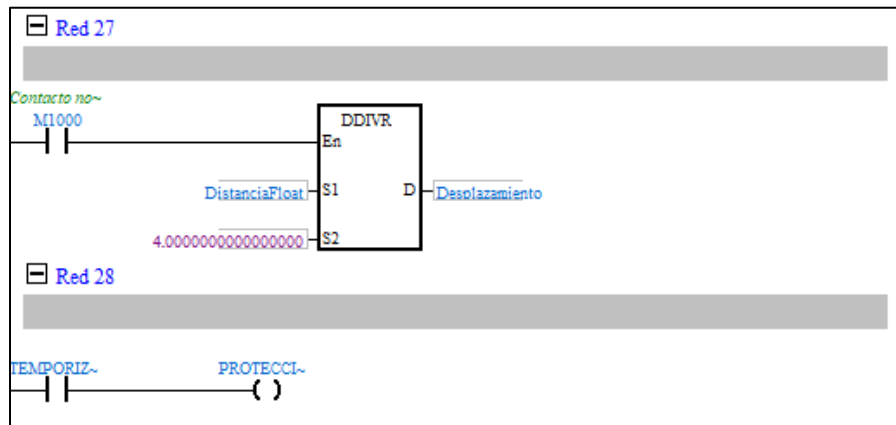


Figura 65. Red 27 a red 28 final del archivo Ladder Torcopren's.

El lector puede recurrir al Anexo Técnico Número 1, en el cual se especifica la funcionalidad de cada una de las redes y elementos del diagrama de escalera de la maquina Torcopren's.

### 3.3 Diseño de la interfaz de supervisión y monitoreo

El software que se emplea en el proyecto para diseñar y completar el sistema SCADA es la herramienta DIAView de DELTA, [72] el cual se implementa como herramienta HMI para la supervisión y monitoreo Para la MUE por las ventajas relacionadas con la compatibilidad del propio PLC Delta y que además es bastante comercial por lo cual existe gran cantidad de tutoriales.

Dentro de sus ventajas se encuentra:

- Software desarrollador gratuito \$0.
- Programa de usuario flexible e intuitivo.
- Arquitectura de software abierta.
- Excelente Plataforma de visualización gráfica y de animaciones.
- Módulos integrados de alarmas, recetas, históricos sin costo adicional.
- Diccionario flexible de variables.
- Fácil uso de scripting (VBScript).
- Gestión eficaz de usuarios.
- Comunicación industrial estable.
- Excelente precio para una muy buena relación Costo/Beneficio.

### Diseño del HMI en DIAView

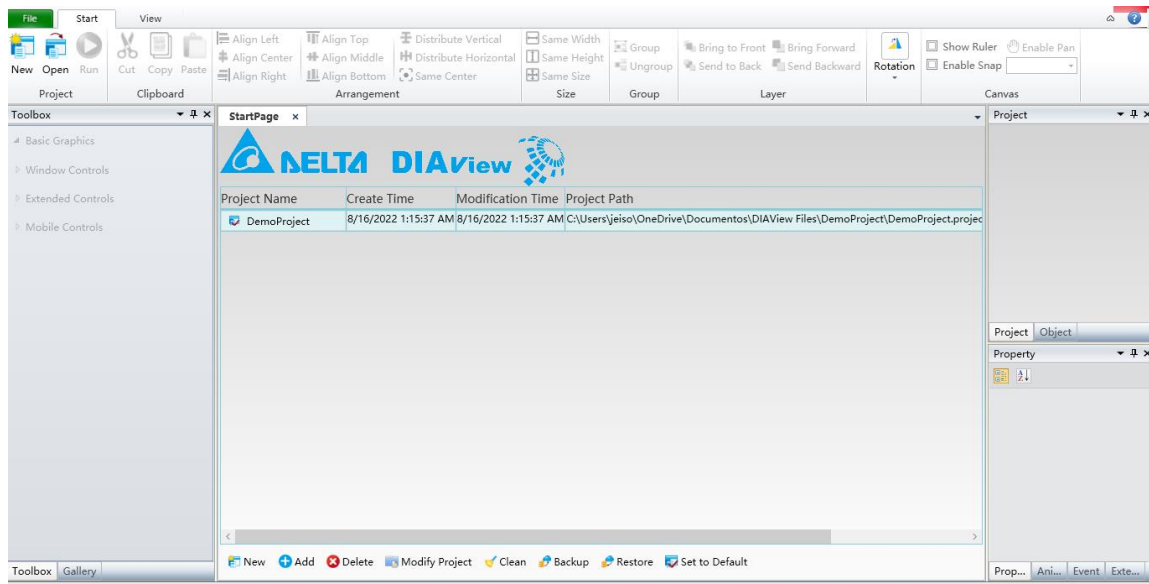
A continuación, se presenta de manera general, los diferentes pasos lógicos para la configuración del programa y la creación de elementos gráficos de monitoreo y supervisión. Sin embargo, es de aclarar que en el “Anexo B Programación del Sistema de Supervision y Monitoreo” se presenta de manera detallada la programación realizada del HMI en DIAView para la MUE Torcopren´s.

### **Procedimiento de ingreso y puesta en marcha del software DiaView**

Para entrar y familiarizarse con el programa DIAView se deben seguir los siguientes pasos:

- Abrir desde el icono de escrito la herramienta.
- Dar clic en “nuevo proyecto”, elegir un nombre y una ruta de almacenamiento.
- En este caso se crea el proyecto maquina de compresión.
- Se despliega una ventana de trabajo en blanco que representa el nuevo proyecto creado en la pagina de inicio del programa.
- Se inicia el desarrollo del HMI dando clic en el icono “añadir ventana”.
- A partir de este momento el usuario puede empezar a añadir los componetes graficos que desee para su interfaz hombre maquina.

En la siguiente imagen el lector puede observar la ventana de inicio del software DiaView.



*Figura 66. Pantalla de inicio de la herramienta DiaView.*

### **Creacion de la Interfaz Grafica Humano Computadora**

En este punto, se inicia el diseño añadiendo los simbolos distintivos universitarios, como es el caso del escudo de la Corporación Universitaria AUTONOMA del Cauca,

los títulos del sistema y los paneles de componentes de control, que agrupan botones por funcionalidades, además de los ejes de gráficos y de otros indicadores de seguridad del proceso.

En el “Panel de Control”, se generan los botones de control del proceso, los cuales adquieren propiedades compartidas, incluidos nombres, coordenadas, tamaños, visualización y representación de control de la ventana, los cuales están asociados a las variables de automatización, entre los cuales están:

- **Encender el variador:** Tiene la propiedad de activar el Variador de frecuencia del motorreductor.
- **Iniciar prueba:** Permite activar el motor e iniciar el ensayo de compresión.
- **Paro de emergencia:** En caso de riesgo de accidente en la manipulación de la máquina, la opción permite detener el proceso de compresión.
- **Generar reporte gráficos:** Permite visualizar la gráfica del proceso en tiempo real y generar los reportes correspondientes.
- **Liberar:** En el caso de atascamiento producido por un material con una densidad muy alta para el proceso de compresión, se devuelve el cabezal a su posición de inicio.

En el Panel Gráfico, se configuran los ejes X y Y en el plano cartesiano, asociando la información generada por los sensores y de las variables correspondientes. Es decir el eje X corresponde a la deformación por compresión en milímetros y el eje Y corresponde al esfuerzo aplicado sobre la probeta en Pascales, la lectura se realiza en cada instante de muestreo del PLC sobre la probeta, lo anterior permite que en tiempo real se visualicen las gráficas deformación vs desplazamiento. En la figura 67 se puede observar la disposición final de los elementos gráficos que componen el HMI de la MUE Torcopren's.

En el Panel “Indicador”, se generan los botones e indicadores, que igualmente adquieren propiedades compartidas, incluidos nombres, coordenadas, tamaños, visualización y representación de control de la ventana, los cuales están asociados a las variables de automatización, entre los cuales están:

- Indicadores que representan características específicas en forma de texto observable de la fuerza aplicada en Kg y desplazamiento en mm.
- Indicadores de luz visible, usados para mostrar el estado del Movimiento del motor en los procedimientos de compresión y descompresión.
- Indicadores para determinar características especiales de las probetas PLA, que deben ingresar, para cálculos específicos en el programa, como: ingresar área en mm y la longitud en cm de la probeta.

A continuación, se presenta la gráfica del Supervisorio en la figura 67.

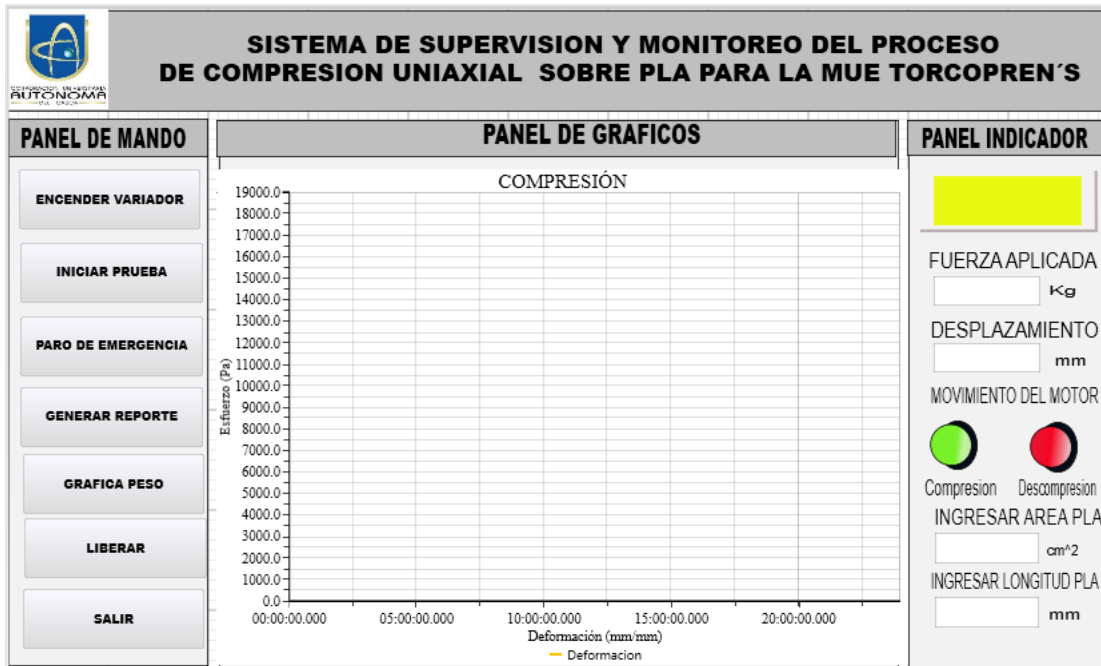


Figura 67. Interfaz de supervisión de la MUE Torcopren's

### Comunicación entre la ventana DIAView y las variables de proceso del PLC

Se configura un “canal” de comunicación mediante el protocolo RS-485 a través del cual se transmite la información en código ASCII entre software DIAView y otros equipos conectados para lograr la transmisión de información de datos. Se registran los parámetros de comunicación, “Puerto serie COM3” y se establece los parámetros de serie.

Una vez configurado el dispositivo para comunicarse con el PLC, se crean las variables del proyecto con el fin de mostrar y controlar las acciones en tiempo real. Estas variables personalizadas, son gestionadas por “Diccionario de variables” y corresponden a las variables capturadas por el PLC en los diferentes sensores y actuadores. Para configurar las variables se ingresan las características técnicas de la variable, las cuales deben ser idénticas a las generadas en el archivo Ladder diseñado para el PLC. A continuación, se observa el repositorio de variables usadas.



Name	Address	Associated Variables	Value	Data Conversion	Read or Write	Scan Time	Description
1 Encendido_Variador	M:8/BOOL	Var.VariableGroup0.Encendido_Va		No Conversion	Read and Write	1	
2 Marcha_Variador	Y:0/BOOL	Var.VariableGroup0.Marcha_Variac		No Conversion	Read and Write	1	
3 Apagar_Variador	M:7/BOOL	Var.VariableGroup0.Apagar_Variac		No Conversion	Read and Write	1	
4 Puesta_Marcha	M:6/BOOL	Var.VariableGroup0.Puesta_Marcha		No Conversion	Read and Write	1	
5 Final_Carrera_Arriba	X:0/BOOL	Var.VariableGroup0.Final_Carrera_		No Conversion	Read and Write	1	
6 Final_Carrera_Abajo	X:1/BOOL	Var.VariableGroup0.Final_Carrera_		No Conversion	Read and Write	1	
7 Motor_Abajo	Y:2/BOOL	Var.VariableGroup0.Motor_Abajo		No Conversion	Read and Write	1	
8 Giro_Variador	Y:1/BOOL	Var.VariableGroup0.Giro_Variador		No Conversion	Read and Write	1	
9 Motor_Arriba	Y:3/BOOL	Var.VariableGroup0.Motor_Arriba		No Conversion	Read and Write	1	
10 Celda_Carga	D:0/WORD	Var.VariableGroup0.Celda_Carga		No Conversion	Read and Write	1	
11 Fuerza	D:6/FLOAT	Var.VariableGroup0.Fuerza		No Conversion	Read and Write	1	
12 Area	D:9/FLOAT	Var.VariableGroup0.Area		No Conversion	Read and Write	1	
13 Liberar	M:9/BOOL	Var.VariableGroup0.Liberar		No Conversion	Read and Write	1	
14 Desplazamiento	D:18/FLOAT	Var.VariableGroup0.Desplazami		No Conversion	Read and Write	1	
15 Deformacion	D:12/FLOAT	Var.VariableGroup0.Deformacion		No Conversion	Read and Write	1	
16 Area_m	D:24/FLOAT	Var.VariableGroup0.Area_m		No Conversion	Read and Write	1	
17 kilogramos	D:4/FLOAT	Var.VariableGroup0.kilogramos		No Conversion	Read and Write	1	

Figura 68. Cuadro de configuración diccionario de variables.

Cada variable del “Diccionario del Proyecto” debe ser asociada en un nuevo grupo de variables llamado “VariableGroup0”, con el objeto de dar el ingreso de: nombre, tipo de valor, valor inicial, valor remanente, valor mínimo, valor máximo, banda muerta, dígito decimal, unidades de ingeniería, y dominio, generándose un cuadro de descripción de la respectiva variable incluida, tal como se presenta en el cuadro siguiente.

Name	Variable Type	Initial Value	Retentive Value	Minimum Value	Maximum Value	Deadband	Decimal Digit	Eng Units
2 Marcha_Variador	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
3 Apagar_Variador	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
4 Puesta_Marcha	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5 Final_Carrera_Arriba	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
6 Final_Carrera_Abajo	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
7 Motor_Abajo	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
8 Giro_Variador	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9 Motor_Arriba	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
10 Celda_Carga	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	Gramos
11 Fuerza	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	Newtons
12 Deformacion	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	Pascales
13 Area	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	100	0	0	Metros Cua
14 Liberar	Digital	False	<input type="checkbox"/>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
15 Longitud_PLA	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	
16 Desplazamiento	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	
17 Area_m	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	
18 kilogramos	Analog	0	<input type="checkbox"/>	0	10000	0	0	

Figura 69. Cuadro asociación de variables en “VariableGroup”

### Configuración de Reportes

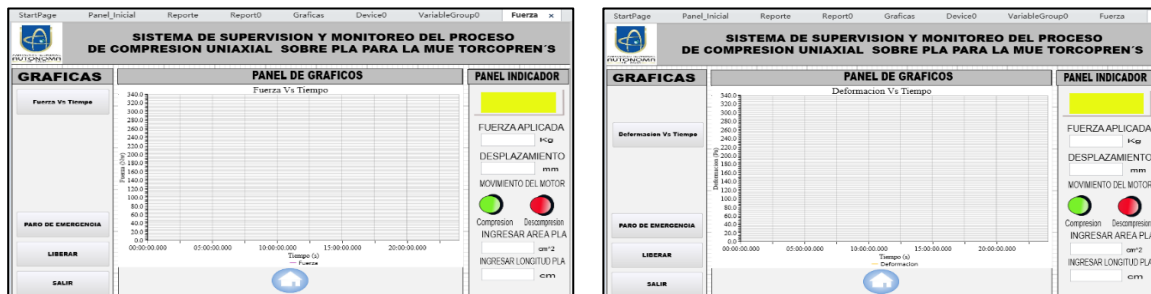
La configuración de reportes consiste en la generación de un archivo tipo tabla, el cual es generado por la interfaz donde se almacena el historico del cambio a través del tiempo de las variables de proceso, esto permite que los datos puedan ser exportados hasta otra herramienta de análisis de resultados, por ejemplo, Matlab o Excel.

ITEM	Peso (gr)	Esfuerzo (Pa)	Longitud (mm)	Desplazamiento(mm)	Deformacion
1	0	0	60	0	1
2	316	17310	60	1	0.983333333
3	324	17314	60	2	0.966666667
4	324	17313	60	3	0.95
5	324	17314	60	4	0.933333333
6	417	17324	60	5	0.916666667
7	417	17360	60	6	0.9
8	774	17414	60	7	0.883333333
9	774	17445	60	8	0.866666667
10	774	17473	60	9	0.85
11	1234	17517	60	10	0.833333333
12	1234	17526	60	11	0.816666667
13	1597	17562	60	12	0.8
14	2564	17607	60	13	0.783333333
15	2564	17632	60	14	0.766666667
16	2564	17679	60	15	0.75
17	2564	17696	60	16	0.733333333
18	3075	17698	60	17	0.716666667
19	3075	17725	60	18	0.7
20	3263	17728	60	19	0.683333333
21	3956	17739	60	20	0.666666667
22	3956	17745	60	21	0.65

Figura 70. Ejemplo de un reporte generado por HMI de la MUE Torcopren’s

### Generación de las gráficas de las variables de proceso

El trazo de las funciones de fuerza, deformación, desplazamiento y longitud, se configuran a través de tablas de valores de las variables X,Y las cuales se ubican en el plano cartesiano conformando la grafica de la función, aquí las propiedades del recuadro de graficos permite asociar la variables provenientes del proceso enviadas por PLC con cada eje del grafico.



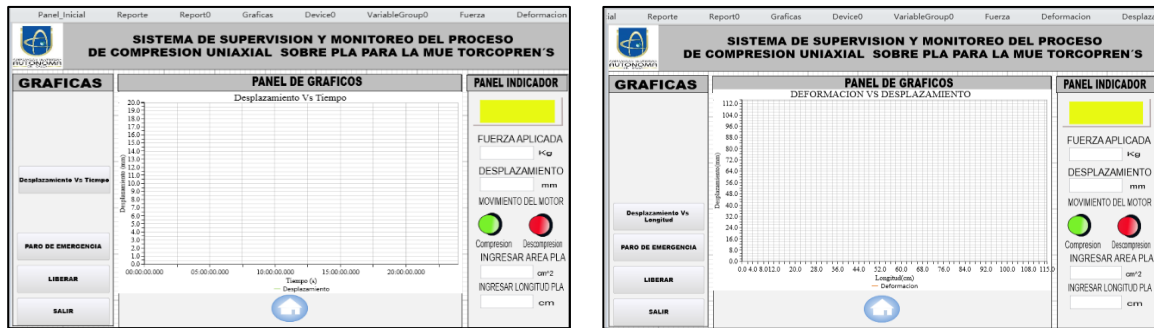


Figura 71. Gráficos de las variables posibles en el HMI de la MUE Torcopren's.

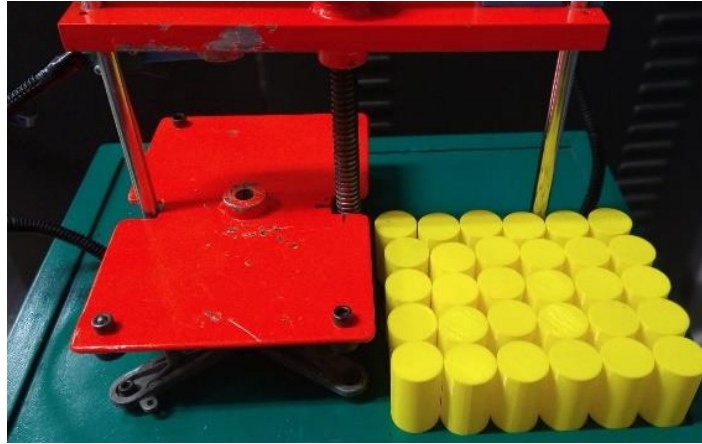
## 4 CAPÍTULO: PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez realizado el prototipo de automatización, es decir, planos, bocetos, diseño 3D, instrumentación, conexiones eléctricas, diagramas de automatización y finalmente el sistema de supervisión y monitoreo en la MUE Torcopren's, se da paso a la realización de prácticas de compresión uniaxial sobre PLA, y generar como resultado para los usuarios el registro de la información de forma gráfica para las variables esfuerzo-deformación.

### 4.1 Descripción de las pruebas realizadas

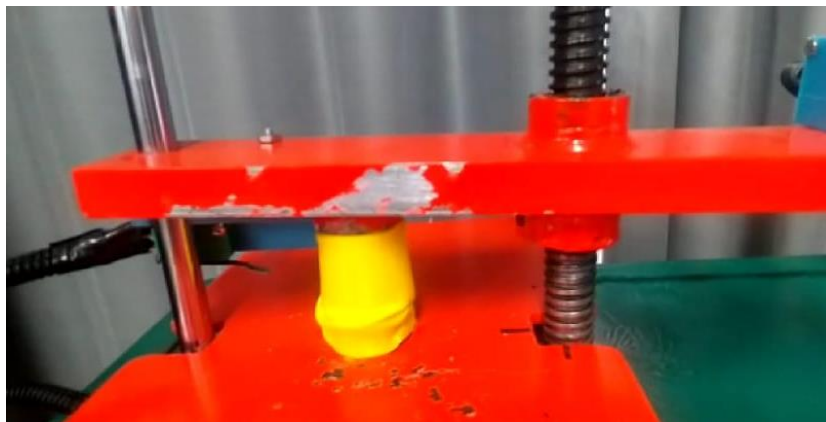
Los ensayos de compresión sobre material PLA, se realizan con probetas diseñadas de acuerdo con la norma ASTM-695, se realiza la impresión de 20 muestras cilíndricas de tamaño 30mm de diámetro y de longitud el doble de su ancho (60mm) con el objetivo de registrar el esfuerzo y deformación. La densidad utilizada es 10 y 15 % de material PLA. Todos los ensayos se realizan a una velocidad constante, obteniéndose información de la maquina como: la fuerza aplicada, el esfuerzo, la deformación y compresión con la elasticidad de deformación. Todas estas variables pueden ser procesadas en la herramienta Matlab, tal como se muestra en los resultados abajo obtenidos.

El procedimiento utilizado es el descrito en el Modelo de Proceso MUE Torcopren's explicado anteriormente en el Ítem. 2.1.1 Modelado ISA S88 y norma ASTM 695 para probetas plásticas.



*Figura 72. Probetas para ensayos.*

Los ensayos registrados son diez (10) y en ellos se busca alcanzar la forma típica de la curva de compresión uniaxial para materiales plásticos, además de otros datos. El ensayo puede verse en la siguiente figura.



*Figura 73. Ensayo real de compresión sobre la MUE Torcopren's.*

Al terminar todos los ensayos de compresión, los datos son almacenados y procesados de tal manera que permita fácilmente analizar los resultados obtenidos individualmente para cada prueba. Dicho análisis consiste en calcular datos como:

- Esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ) y deformación de fluencia ( $\epsilon_{cy}$ ), representan el primer esfuerzo que tiene lugar a un incremento en la deformación sin un incremento del esfuerzo, también conocida como deformación irre recuperable.
- Esfuerzo de rotura ( $\sigma_B$ ) y deformación de rotura ( $\epsilon_{CB}$ ), punto en cual el material falla.
- Esfuerzo máximo de compresión ( $\sigma_M$ ) y deformación máxima de compresión ( $\epsilon_{CM}$ ), soportados por la probeta de PLA.

Los puntos característicos se pueden ver en el gráfico de compresión ideal del PLA.

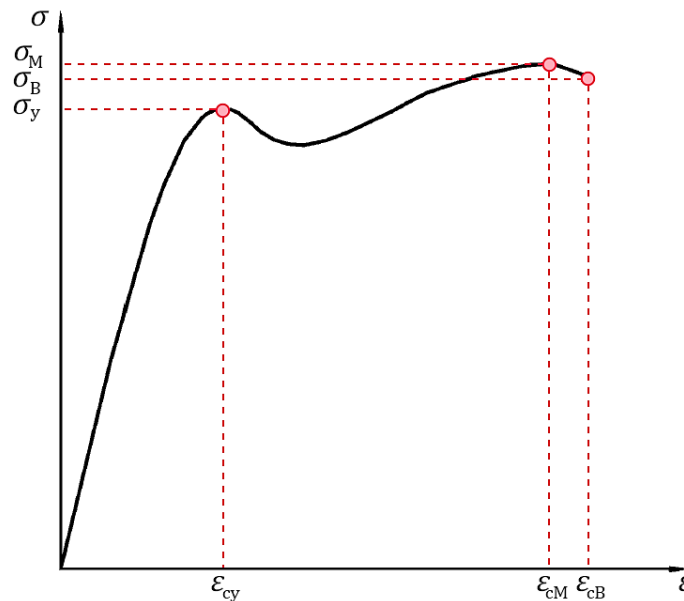


Figura 74. Curva ideal de compresión.

Además, para cada resultado de ensayo se calcula su módulo de elasticidad o módulo de Young, que, en el caso del PLA según estudios de la Universidad Jaime I, se encuentra entre 3.0 a 3.6 GPa [54], así como también lo indica Lugo Velásquez en “Resistencia a compresión de probetas fabricadas en PLA con distinto relleno” [55].

## 4.2 Ensayos de compresión

En esta Sección observa cada uno de los diez ensayos de compresión realizados en la MUE Torcopren's junto con su tabla de resumen de resultados.

### Ensayo 1

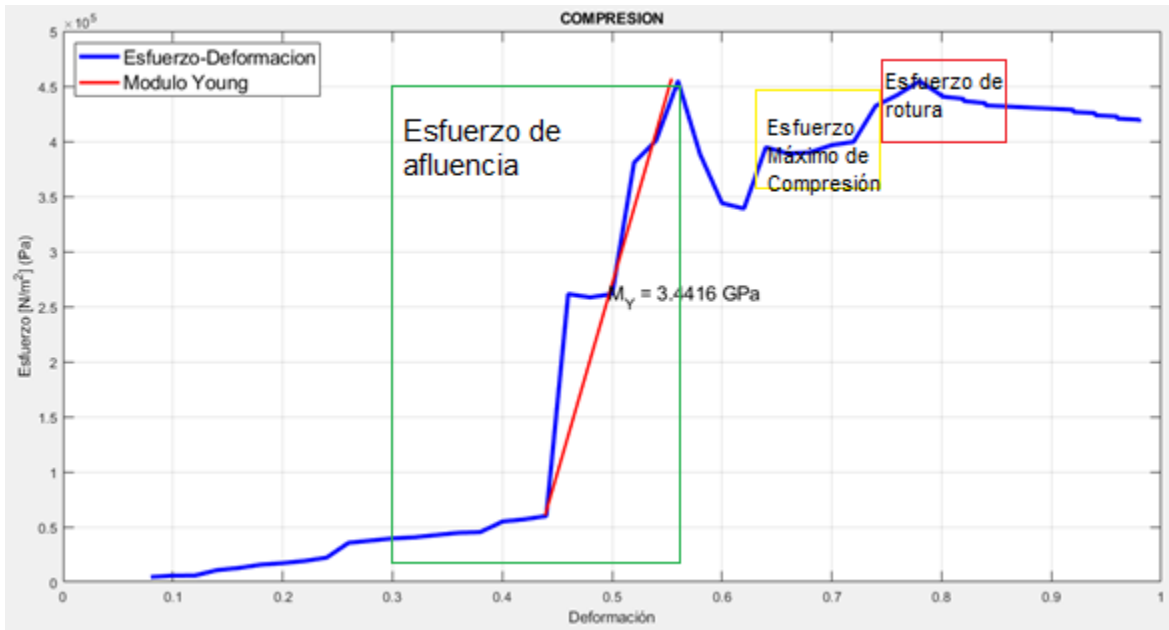


Figura 75. Curva de compresión ensayo 1.

```

|----- RESULTADOS -----|
Modulo de Young = 3.4416 GPa
G_Y = 0.457 GPa, EcY = 0.55415
G_B = 0.45845 GPa, EcB = 0.78456
G_M = 0.41472 GPa, EcM = 0.98041

```

En la figura 75. Curva de compresión ensayo 1, se puede observar que a medida que la fuerza ejercida por los cabezales empieza a aumentar, la curva se torna ascendente, mostrando la zona elástica del material, determinado de esta manera hasta qué fuerza de compresión puede ser sometida la probeta de material PLA conservando su estructura física. Mediante la lectura de los puntos máximo y mínimo de la curva, es posible trazar una pendiente (recta roja) y hallar su valor, el cual es establecido por módulo de Young en 3.4416 *GPa*.

La probeta al superar su límite elástico presenta deformación permanente cuyo comportamiento se conoce como esfuerzo de fluencia, presentando en la curva un área en la que el material ofrece una última resistencia antes de llegar a un estado de deformación irre recuperable con un esfuerzo de fluencia de 0.457 *GPa* y una deformación de 0.55415.

Después de alcanzar el esfuerzo máximo, el área de la sección empieza a reducirse, llegando a un estado de falla con un esfuerzo de rotura 0.45845 y deformación de rotura de 0.78456. La probeta ha alcanzado un esfuerzo máximo de 0.41472 y deformación máxima de 0.98041.

## Ensayo 2

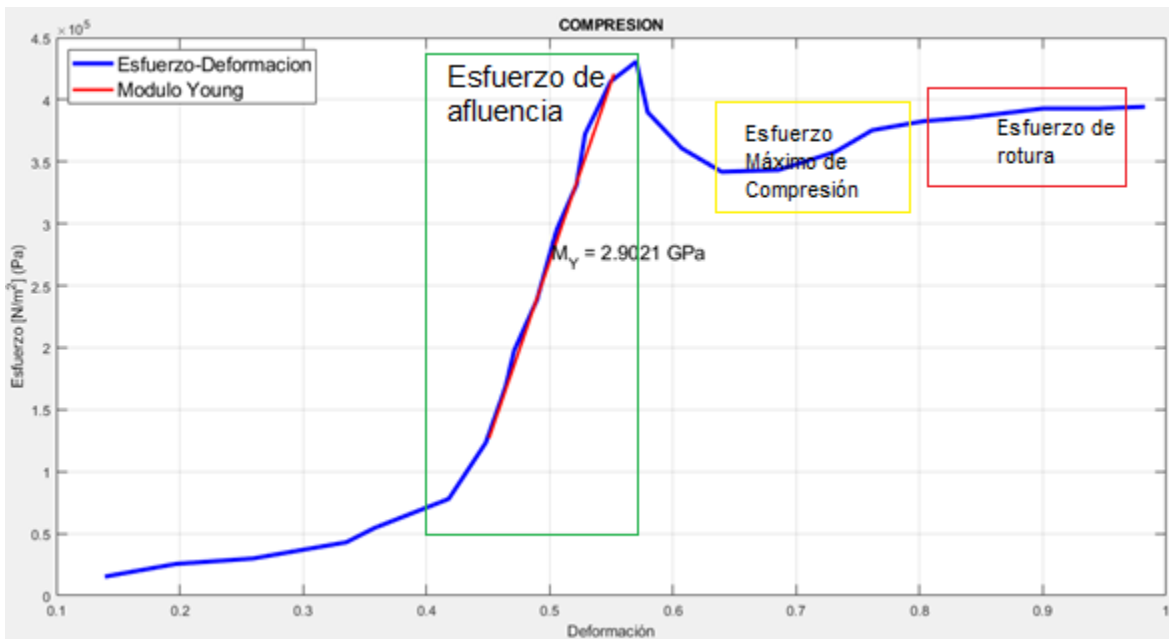


Figura 76. Curva de compresión ensayo 2.

----- RESULTADOS -----	
Modulo de Young = 2.9021 GPa	
G_Y = 0.42071 GPa,	EcY = 0.55213
G_B = 0.39439 GPa,	EcB = 0.90855
G_M = 0.38675 GPa,	EcM = 0.98001

En la Figura 76. Curva de compresión ensayo 2, a medida que la fuerza ejercida por los cabezales empieza a aumentar, la curva se torna ascendente, mostrando la zona

elástica del material, determinado de esta manera hasta qué fuerza de compresión puede ser sometida la probeta de material PLA conservando su estructura física. Mediante la lectura de los puntos máximo y mínimo de la curva, es posible trazar una pendiente y hallar su valor, establecido por el módulo de Young de 2.9021 *GPa*.

La probeta al superar su límite elástico presenta deformación permanente cuyo comportamiento se conoce como esfuerzo de fluencia, presentando en la curva un área en la que el material ofrece una última resistencia antes de llegar a un estado de deformación irre recuperable con un esfuerzo de fluencia de 0.42071 *GPa* y una deformación de 0.55213.

Después de alcanzar el esfuerzo máximo, el área de la sección empieza a reducirse, la probeta llega a un estado de falla con un esfuerzo de rotura 0.39439 y deformación de rotura de 0.90855. La probeta ha alcanzado un esfuerzo máximo de 0.38675 y deformación máxima de 0.98001.

El análisis de las gráficas de los ensayos número 3 hasta el 10 no se describen en este apartado, puesto que sus resultados y el detalle de su análisis presentan similitud con los que si fueron descritos, como se puede observar todos ellos poseen tendencias similares y los comportamientos de las curvas se parecen a las que fueron explicadas, sin embargo, para complementar la información se puede observar el ANEXO C, cabe resaltar que los datos obtenidos en cada ensayo son usados y hacen parte del análisis de resultados descrito en el ítem 4.3.

### 4.3 Análisis de resultados

A continuación, se procede a analizar los datos obtenidos en los ensayos previos, por tanto, lo que se pretende es calcular a partir de las mediciones del módulo de elasticidad en cada ensayo, indicadores como: promedio, mediana, distribución, y desviación estándar, los cuales permitirán deducir la naturaleza del material PLA, ensayado en la MUE Torcopren's. A continuación, se muestra la tabla resumen del módulo de elasticidad en cada prueba.

*Tabla 15. Resumen del módulo de elasticidad en los ensayos.*

<b>Ensayo</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Modulo Young [GPa]</b>	3.44	2.9	3.52	3.78	3.77	3.63	3.10	3.33	3.22	3.29

#### 4.3.1 Promedio



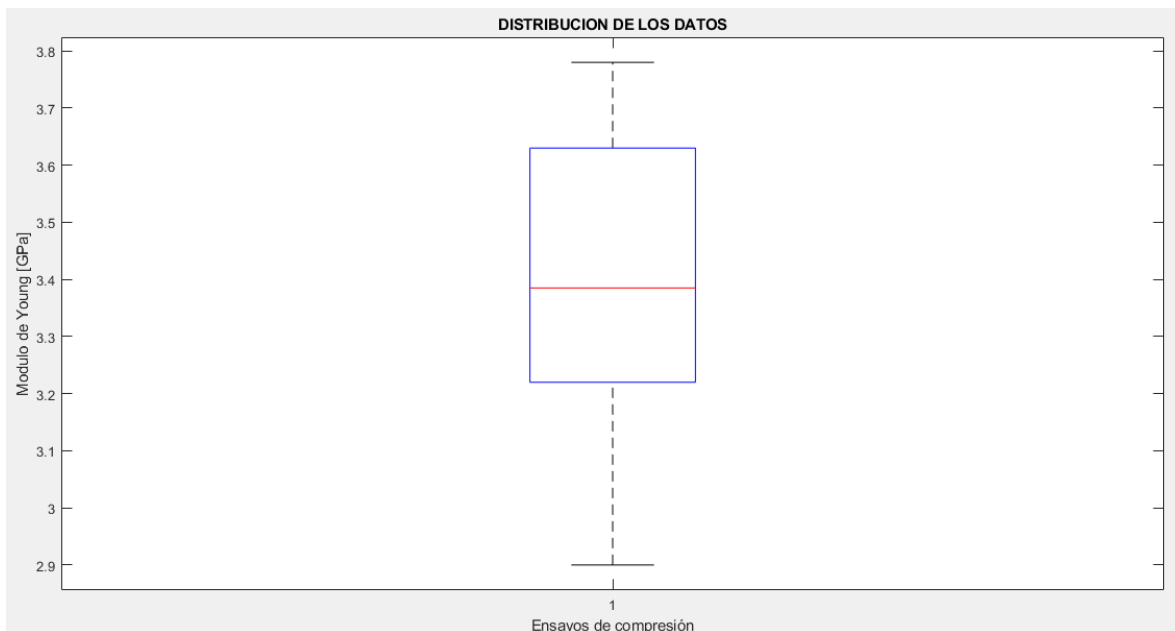
La primera medida estadística de indicación que se utiliza para el tratamiento de los datos es la media aritmética, la cual con igual nivel de importancia para cada dato generado permite establecer el valor promedio de los ensayos realizados respecto al módulo de Young. Su cálculo se realiza mediante la aplicación de la ecuación siguiente.

$$\overline{M\_Y} = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} M\_Y(i)}{10} = 3.398 \text{ GPa}$$

Sin embargo, el lector debe tener en cuenta que la media aritmética, tiene como desventaja que es afectada por valores atípicos o valores de extremos y en ocasiones no representa la realidad de la muestra. Para efectos de este proyecto el promedio hallado se encuentra dentro del rango de valores de 3.0 a 3.6 GPa, tal como la comunidad internacional lo refiere para el material PLA.

### 4.3.2 Distribución

A continuación, se construye un diagrama de caja y bigotes el cual permite observar la existencia de valores atípicos en los datos recolectados, además de la distribución de los valores obtenidos.



*Figura 85. Diagrama de caja y bigotes.*

Del diagrama anterior se puede inferir que; en primer lugar, no existen valores atípicos en las medidas de elasticidad, segundo; que el 25% de los datos se encuentra entre valores de elasticidad de 2.9GPa hasta 3.2GPa, a diferencia del cuarto cuartil el cual muestra menor presencia de datos. También es notorio que el 50% de los datos, o la mitad de los ensayos, se encuentra distribuido entre el

3.2GPa y 3.6GPa, por otra parte, esta distribución es de asimetría positiva, pues la mediana con aproximadamente 3.4GPa está más cercana hacia la parte inferior de la caja.

### 4.3.3 Desviación estándar

Adicionalmente se desea calcular la variación o dispersión de los datos de elasticidad, por lo cual se procede a calcular la desviación estándar como se muestra a continuación.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (MY(i) - \mu)^2}$$

Encontrando un valor de  $\sigma = 0.2866$ , lo cual implica que la mayoría de los datos se encuentran bastante cercanos al valor de la media aritmética o simplemente poca varianza.

### 4.3.4 Error cuadrático medio

En esta sección se busca comparar que tan diferente es el cálculo del módulo de elasticidad encontrado por medio de la MUE Torcopren's, frente al valor intermedio (3.3GPa) propuesto en rango tolerable (3.0 – 3.6GPa) obtenido por la Universidad Jaime I de España en sus análisis de materiales en laboratorio [54] mediante el cálculo del ECM (Error Cuadrático Medio), aunque también se debe tener en cuenta que estas propiedades varían ligeramente de acuerdo con la receta de elaboración de cada fabricante del material PLA. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}$$

Donde  $\hat{Y}_i$  es el valor estimado o entregado por la MUE Torcopren's en cada uno de sus ensayos de compresión, mientras que  $Y_i$  indica el valor intermedio del módulo de elasticidad hallado en la Universidad Jaime I. Este cálculo se resuelve en la herramienta matemática Matlab con ayuda del comando "immse ()", arrojando un valor resultado de  $ECM = 0.08356$ , lo cual indica que el ajuste de los datos obtenidos en la MUE Torcopren's respecto a los datos de laboratorio es bastante alto, podemos interpretar esto como una predicción y/o cálculo entregado por la maquina MUE bastante optima y no alejada de la realidad de los laboratorios.

## 5 CAPITULO: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Respecto al objetivo principal del proyecto, el cual consiste en implementar un sistema de supervisión y monitoreo para la máquina universal de ensayos Torcopren's que permita la realización de prácticas de compresión uniaxial sobre PLA, se puede afirmar que se ha cumplido completamente.
- Los ensayos de compresión entregados por la MUE Torcopren's se encuentran dentro de los valores normales y de similitud a la comunidad internacional, por tanto, esta máquina se convierte en una buena opción para un laboratorio de fabricación digital cuando se desee ensayar piezas de material PLA con diferentes formas de llenado y densidades de impresión.
- El previo diagnóstico completo y correcto de la MUE deja en evidencia los aspectos de mejora, cambio y/o reparación sobre la misma, permitiendo priorizar, calificar y solventar cada una de las fases de implementación de acuerdo con los intereses del proyecto.
- La metodología ágil propuesta para abordar el actual proyecto de ingeniería mediante sprints de trabajo, los cuales incluyen tareas programadas, nuevos hallazgos, revisión de avances y opciones de solución, es una opción a la hora de abordar un proyecto de automatización.
- Respecto a la instrumentación, la instalación de un nuevo motorreductor acorde con las características mecánicas necesarias del ensayo y eléctricas frente al variador de frecuencia, para realizar ensayos de compresión en las probetas fue una de las modificaciones más importantes en el hardware, pues permitió hacer ensayos a velocidad baja, constante y gran torque, sin hacer cambios drásticos al panel de mando eléctrico entre otros aspectos de la estructura.
- La instalación de un nuevo sensor de carga acorde con los rangos de fuerza medidos para el PLA (40Kg) y acorde con los espacios físicos de la máquina, permitió actualizar y aumentar el rango de trabajo sustancialmente de la máquina, pues el sensor original de la MUE no permitía registrar completamente la curva del ensayo de compresión debido a que las cargas excedían el límite superior de medición del sensor.
- La adecuación adicional de sensores de fin de carrera electromecánicos, contribuyen al funcionamiento seguro y sin desgaste al impacto entre las

placas fijas y el cabezal móvil de la máquina, lo cual prolongará el tiempo de vida de la instrumentación.

- La adición del sensor encoder permite registrar los datos de deformación uniaxial, en un principio esta variable no era medida en la máquina, por tanto, no era posible calcular una curva correcta y completa de esfuerzo versus deformación.
- El diseño amigable e intuitivo de la interfaz de usuario desarrollada en DiaView, permitirá incluso a los usuarios novatos la realización de ensayos de compresión fácil de realizar y registrar datos para su posterior análisis.
- La herramienta ISPSOft, para programar las instrucciones Ladder al PLC para configurar los módulos de operación, comunicaciones, sensores y actuadores, en conjunto con DiaView resultan en una combinación bastante funcional y versátil que admite las diferentes formas de acción de la MUE, así mismo, transmitir las señales de los sensores: celda de carga, finales de carrera y encoder, para interactuar con los paneles de mando, gráfico y de indicadores, así mismo visualizar, guardar datos de la prueba y opcional, grabación del ensayo.

### **Trabajos Futuros**

La máquina es susceptible de mejora continua, tanto mecánica como de automatización, entre ellas:

- Desarrollar en el programa ISPSOft, las nuevas mejoras, con la inclusión de variables y redes al proceso de compresión.
- Mejorar el sistema de supervisión en DIAView, incluyendo mayores botones de indicadores como: alarmas, indicadores lumínicos, animación, rotación y de videograbación etc.
- Adicionar nueva programación en Matlab, de datos de nuevas variables, para el análisis y generación de nuevos gráficos, con el objeto de censar otros parámetros del material PLA

## Bibliografía

- [1] M. Kuroda y V. Tvergaard, «Effects of texture on shear band formation in plane strain tension/compression and bending,» *International Journal of Plasticity*, vol. XXIII, nº 2, pp. 242-272, 2007.
- [2] M. A. Pereira y T. Barata, «Bamboo as Sustainable Material Used in Design and Civil Construction: Species, Management, Characterization and Applications.,» *Key Engineering Materials*, vol. DCXXXIV, pp. 339-350, 2015.
- [3] F. Shama y P. Sherman, «Evaluation of some textural properties of foods with the instron universal testing machine,» vol. IV, pp. 344-352, 1973.
- [4] E. Huerta, J. Corona y A. Oliva, «Universal testing machine for mechanical properties of thin materials,» *Revista Mexicana de Física*, vol. LVI, nº 4, pp. 317-322, 2010.
- [5] M. L. Becerra Chito, M. L. Guzmán Muñoz y J. J. Betancourt Arenas , «Diseño e implementación de un sistema de control para la máquina de ensayos de compresión “Torcopren's”, del laboratorio de ingeniería industrial de la Fundación Universitaria de Popayán,» Popayán, 2012.
- [6] Z. Raheem, «Designation: D695 – 15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics,» *American Society for Testing and Materials*, 2019.
- [7] C. Niessen, «Hierarchical design methodologies and tools for VLSI chips,» *Proceedings of the IEEE*, vol. LXXI, nº 1, pp. 66-75, 1983.
- [8] H. Lipp, «Methodical aspects of logic synthesis,» *Proceedings of the IEEE*, vol. LXXI, nº 1, pp. 88-97, 1983.
- [9] J. Calderón, «Mediciones e instrumentación industrial,» Span, 2004, pp. 1-64.
- [10] L. M. Manene, «Blog de Luis Miguel Manene,» 2011 Julio 28 . [En línea]. Available: <https://luismiguelmanene.wordpress.com/2011/07/28/los->

diagramas-de-flujo-su-definicion-objetivo-ventajas-elaboracion-fases-reglas-y-ejemplos-de-aplicaciones/. [Último acceso: 1 Marzo 2021].

- [11] E. Flores Martínez, P. Reyna Guerra, J. L. Jiménez Reyes , J. Garrido Meléndez y Q. Cruz Hernández Escobedo, «Diseño y construcción de prototipo de entrenamiento para prácticas en instrumentación y control,» *Pistas Educativas*, vol. XXXIX, nº 128, pp. 459-472, 2018.
- [12] S. Pagès, J. Costa y J. Mayugo, «Tratamiento de la fatiga en el diseño estructural,» *VIII Congreso Nacional de Propiedades de solidos*, pp. 831-839, 2002.
- [13] V. A. Ramírez Elías , I. A. Rivers Castañeda, . J. N. Duarte Forero y P. A. Edwin Daniel, «Estudio de resistencia a la compresión de materiales compuestos laminados reforzados y barrenados,» *Jovenes en la ciencia*, vol. V, nº 1, pp. 1-5, 2019.
- [14] J. Torres y J. Redondo, «Reparación y automatización de una máquina universal de ensayos,» *Revista ciencia e ingeniería*, vol. XXX, nº 2, pp. 171-179, 2009.
- [15] J. Casado, I. Carrascal y J. Polanco, «Aplicación del análisis dinámomecánico a la delimitación de las condiciones críticas en la fatiga de materiales poliméricos,» *Anales de mecánica de la fractura*, vol. I, nº 25, pp. 397-402, 2008.
- [16] F. E. Moreno-García, J. J. Ramírez Matheus y O. D. Ortiz-Ramírez, «Sistema de supervisión y control para un banco experimental de refrigeración por compresión,» *Revistas UFPS*, vol. XXI, nº 1, pp. 97-107, 2016.
- [17] J. Ramos Guardarrama , O. Hernández Arey y R. C. Silverio Freire, «Sistema de supervisión para el monitoreo de redes eléctricas inteligentes,» *Ingeniería Energética*, vol. XL, nº 3, pp. 264-272, 2019.
- [18] Z. Shushang, . L. Bin, R. Yam y H. Jianhai, «The Design of Measurement and Control System WJ-10 Universal Tension and Compression Testing Machine Based on C8051F020 and Virtual Instrument,» *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, pp. 833-836, 2010.
- [19] D. Jingqing, . S. Gao y N. Shaohua, «New Idea for Hydraulic Testing Machine with Stress and Strain Rates Controlled and Its Realization,» *2010*

*International Conference on intelligent Computation Tecnology and Automation* , vol. II, pp. 768-722, 2010.

- [20] M. Natalia Agredo, J. Quintana y . J. F. Florez, «Diseño y pruebas de un sistema de monitoreo y supervisión para una máquina universal de ensayos,» *Prospect*, vol. XIII, nº II, pp. 25-37, 2015.
- [21] D. S. Simbeye , «Computarized Measurement and Control System of the Universal Testing Machine Based On Virtual Instruments,» *Scltech Research Organisation*, vol. V, nº 2, pp. 456-465, 2016.
- [22] A. Nava Gastelum , M. Siqueiros Hernández, G. Benjamín, Y. Vega y I. Mendoza Muñoz, «Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica,» *Revista Materia* , vol. XXIII, nº 2, pp. 1-12, 2018.
- [23] M. Faujiya Afrose, S. H. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad y I. Sbarski, «Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material,» *Progress in Additive Manufacturing*, vol. I, nº 1-2, pp. 21-28, 2016.
- [24] M. Faujiya Afrose, S. Masood, M. Nikzad y P. Iovenitti, «Effects of Build Orientations on Tensile Properties of PLA Material Processed by FDM,» *Advanced Materials Research*, Vols. %1 de %2MXLIV-MXLV, pp. 31-34, 2014.
- [25] S. Anand Kumar y S. Narayan, «Tensile testing and evaluation of 3D-printed PLA specimens as per ASTM D638 type IV standard,» pp. 79-95.
- [26] H. Kweon, S. Choi, Y. Kim y K. Nam, «Development of A new UTM (Universal Testing Machine) system for the Nano/Micro In-Process Measurement,» *World Scientific*, vol. XX, pp. 4432-4438, 2006.
- [27] C. Holt, «Measurement of tomato firmness with a universal testing machine,» *Journal of Texture Studies*, vol. I, nº 4, pp. 491-501, 1970.
- [28] B. Yushi y B. Towers, «Basic From Strenght Test of Steel Plates,» vol. I, nº 344, 1984.
- [29] L. F. Walubita , J. Zhang, A. N. M. Faruk y A. E. Alvarez, «Laboratory Hot-Mix Asphalt Performance Testing: Asphalt Mixture Performance Tester

Versus Universal Testing Machine,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 1, pp. 61-73, 2014.

- [30] R. T. Sataloff y M. M. Johns, Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, McGraw-Hill Interamericana .
- [31] A. A. Martha Natalia y J. A. Quintana Núñez, «Sistema de monitoreo y supervisión de la máquina shimadzu del laboratorio de estructuras de la Universidad del Cauca,» Universidad del Cauca, Popayán, 2014.
- [32] M.-J. Chung y S.-G. Oh, «Development of Micro Universal Testing Machine System for Material Property Measurement of Micro Structure,» *International Conference on Control, Automation and Systems*, nº 970-973, pp. 970-973, 2008.
- [33] Y. Liang , O. Zhao, Y.-L. Long y L. Gardner, «Stainless steel channel sections under combined compression and minor axis bending – Part 1: Experimental study and numerical modelling,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. CLII, nº 1, pp. 154-161, 2017.
- [34] A. P. Montalvo , F. C. Valencia y W. Mosquera, «Máquina universal de ensayos destructivos: instrumentación, control y adquisición de datos,» Universidad Tecnica del Norte, Ibarra, 2018.
- [35] M. Al-Rubaiai, T. Pinto, D. Torres, N. Sepulveda y X. Tan, «Characterization of a 3D-printed conductive PLA material with electrically controlled stiffness,» *ASME*, pp. 1-7, 2017.
- [36] A. Pytel y F. L. Singer, Resistencia de materiales Introducción a la mecánica de sólidos, México D.F: HARLA, 1994.
- [37] C. Rojas, «Ensayos de materiales,» pp. 1-6, 2012.
- [38] J. Torres, M. Cole Allen, DeMastry y Z. D. A. P. Owji, «An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments,» *The Electronic Library*, vol. XXXIV, nº 1, pp. 1-5, 2017.
- [39] S. Fehri, P. Cinelli, M. Coltelli, I. Anguillesi y A. Lazzeri, «Thermal Properties of Plasticized Poly(Lactic) (PLA) Containing Nucleating Agent,» *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. VII, nº 2, pp. 85-88, 2016.



- [40] A. Bhatia, R. Gupta, N. Bhattachayra y H. Choi, «Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application,» *Korea Austrlia Rheology Journal* , vol. XIX, nº 3, pp. 125-131, 2007.
- [41] Y. Woo Kim, E.-C. Shin, S.-G. Bae, K. Taek Lim, P. Seong Soo y E. Young Kim, «Synthesis and characterization of UV-curable polyurethane acrylates with and PEG,» *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. DCLIII, nº 1, pp. 2014-2019, 2017.
- [42] S. Jia, D. Yu, Z. Wang, X. Zhang, L. Chen y L. Fu, «Morphologies, crystallization, and mechanical properties of PLA-based nanocomposites: Synergistic effects of PEG/HNTs,» *Journal of Applied Polymer science*, vol. CXXXVI, nº 18, pp. 1-11, 2019.
- [43] M. Patel, G. Cole, T. Pryor y N. Wilmot , «Development of a novel SCADA system for laboratory testing,» *ISA Transactions*, vol. XLIII, nº 3, pp. 477-490, 2004.
- [44] «OPC (OLE FOR PROCESS CONTROL),» *O.L.E For and P.Control* , pp. 158-170.
- [45] J. A. Velásquez Costa, «Supervisión y Control de Sistemas CIM,» *Paradigmas* , vol. II, nº 1, pp. 165-176, 2010.
- [46] ASTM, «Standard Test Method for compressive properties of Rigid Plastics,» 2002 Agosto 2002. [En línea]. Available: [https://kupdf.net/download/astmd69502a\\_58d2e0d6dc0d60826cc34645\\_pdf](https://kupdf.net/download/astmd69502a_58d2e0d6dc0d60826cc34645_pdf) . [Último acceso: Marzo 1 2022].
- [47] Instrument Society of America, «ANSI/ISA-88.01-1995, Batch Control, Part 1: Models and Terminology,» ISA, Triangle Park, 1995.
- [48] IEC, «International Standard IEC 61131-3,» 2003. [En línea]. Available: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec61131-1%7Bed2.0%7Den.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec61131-1%7Bed2.0%7Den.pdf). [Último acceso: 2022 Marzo 1].
- [49] L. D. Murillo-Soto, «Automatización de pequeña escala con Open Hardware,» *Tecnología en Marcha* , vol. XXVIII, nº 1, pp. 15-23, 2014.
- [50] W. Y. Serna Quilindo, D. C. Vergara González y J. F. Flórez Marulanda, «Procedimiento de modelado ISA S88 para ejecución de órdenes de

producción basadas en récipes,» *Ciencia e ingeniería Neogrnadina*, vol. XXI, nº 2, pp. 107-129, 2011.

- [51] Electrical Chile, Configurar por primera vez Variador de Frecuencia , 2020. [En línea]. Available: <https://www.electricalchile.cl/vdf.php>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [52] ABB, «Qué es un variador de frecuencia: Definición,cómo funciona, características y ventajas,» [En línea]. Available: <https://new.abb.com/drivers/es/que-es-un-variador>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [53] ABB, «Manual del Usuario Convertidores de frecuencia ACS355,» 2018.
- [54] U. J. I, «Propiedades y Limitaciones del PLA,» Google sites, comacooperation@gmail.com , [En línea]. Available: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-l%C3%A1ctico/propiedades-del-pla>.
- [55] G. Lugo Velasquez, «Resistencia a compresión de probetas fabricadas en PLA con distinto relleno,» Universidad de la Laguna, San Cristobal de la Laguna, 2022.
- [56] J. Romagosa, D. Gallego y R. Pacheco, «Miniproyecto Automatización industrial (Auti),» 2010, p. 66.
- [57] Ingeniería Mecafenix, «Ingeniería Mecafenix,» Ingeniería Mecafenix, 26 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/electronica/final-de-carrera/>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [58] OMRON, «OMRON,» 2016. [En línea]. Available: [https://www.ia.omron.com/data\\_pdf/cat/e6c3-c\\_ds\\_e\\_7\\_2\\_csm495.pdf?id=1335](https://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/e6c3-c_ds_e_7_2_csm495.pdf?id=1335). [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [59] Solidworks, «Introducción a Soliworks,» 2020. [En línea]. Available: [https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_ES.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf). [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [60] Dremel, «3D20 Idea Builder,» [En línea]. Available: <https://www.dremel.com/binaries/content/assets/dremel/us/digilab/3d20-documentation/3d20-printer-manual.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].

- [61] itmatters, «Material PLA – Amarillo Filamento de PLA premium de alta calidad para impresoras 3D FDM,» [En línea]. Available: <https://itmatters3d.com/producto/material-pla-amarillo/>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [62] H. Burrola Nuñez, P. J. Herrea Franco, D. E. Rodríguez Félix, R. Meléndez Amavizca, J. I. Cauch Cupul, H. J. Carrillo Escalante y T. J. Madera Santana, «Aprovechamiento de fibras tejidas de yute como material de refuerzo en biocompuestos de ácido poliláctico,» *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, vol. XXII, nº 1, pp. 67-73, 2020.
- [63] AMSAMOTION, «AMSAMOTION,» 2022. [En línea]. Available: <https://mall.amsamotion.com/item-1161.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [64] Ferretronica, [En línea]. Available: [https://ferretronica.com/products/modulo-adaptador-conversor-usb-a-rs485?variant=20081390288989&currency=COP&utm\\_medium=product\\_sync&utm\\_source=google&utm\\_content=sag\\_organic&utm\\_campaign=sag\\_organic&utm\\_campaign=gs-2021-10-19&utm\\_source=google&utm\\_medium](https://ferretronica.com/products/modulo-adaptador-conversor-usb-a-rs485?variant=20081390288989&currency=COP&utm_medium=product_sync&utm_source=google&utm_content=sag_organic&utm_campaign=sag_organic&utm_campaign=gs-2021-10-19&utm_source=google&utm_medium). [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [65] «Manual Base Com,» 2022. [En línea]. Available: [https://www.manualsbase.com/es/manual/428101/stereo\\_receiver/delta\\_electronics/analog\\_input\\_output\\_mixed\\_module\\_dvp06xa-s/](https://www.manualsbase.com/es/manual/428101/stereo_receiver/delta_electronics/analog_input_output_mixed_module_dvp06xa-s/). [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [66] SENA, «DOCPLAYER,» [En línea]. Available: <https://docplayer.es/93978007-Generalidades-unidad-1-introduccion-a-la-automatizacion.html>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [67] Delta, «Delta Electronics,» [En línea]. Available: [http://www.deltronics.ru/images/manual/DVP-PLC\\_PM\\_EN\\_20170615.pdf](http://www.deltronics.ru/images/manual/DVP-PLC_PM_EN_20170615.pdf). [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [68] J. Pedro Romera, J. Antonio Lorite y S. Montoro, AUTOMATIZACION Problemas resueltos de Automatas Programables, Editorial Paraninfo, 1994.
- [69] Delta, «ISPSoft User Manual,» 2011. [En línea]. Available: [http://www.deltronics.ru/images/manual/ISPSoft\\_UM\\_EN\\_20170614.pdf](http://www.deltronics.ru/images/manual/ISPSoft_UM_EN_20170614.pdf). [Último acceso: 2 Marzo 2022].

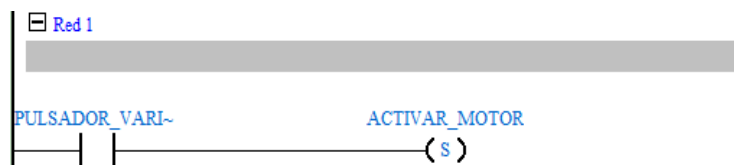
- [70] Delta, «DVP02LC-SL User Manual,» [En línea]. Available: [http://www.deltronics.ru/images/manual/DVP02LC-SL\\_loadcell\\_M.pdf](http://www.deltronics.ru/images/manual/DVP02LC-SL_loadcell_M.pdf). [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [71] Neheyler Mecatronics, «Introducción a Ladder o Kop,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.neheylermechatronics.com/>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [72] Delta, «Delta DIAView SCADA System User Manual,» [En línea]. Available: [https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060701/Manual/DELTA\\_IA-SI\\_DIAView\\_Manual\\_UM\\_EN\\_20190708.pdf](https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060701/Manual/DELTA_IA-SI_DIAView_Manual_UM_EN_20190708.pdf). [Último acceso: 2 Marzo 2022].

## ANEXOS

### Anexo A Programación Ladder de la maquina Torcopren's

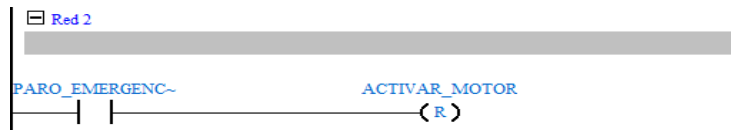
A continuación, se presenta las diferentes redes creadas y la descripción de su correspondiente lógica.

- **Red 1.** Activación del dispositivo Marca 10 ACTIVAR MOTOR



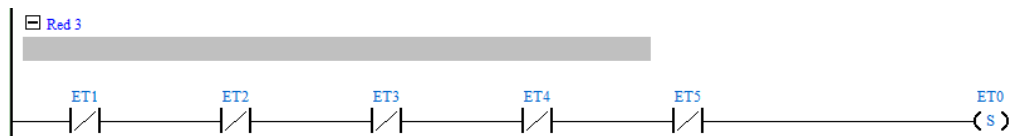
Lógica: **SI** al contacto Pulsador\_Variador le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así se activa la bobina (Set) Activar Motor.

- **Red 2.** Desenergizar la M10 Motor.



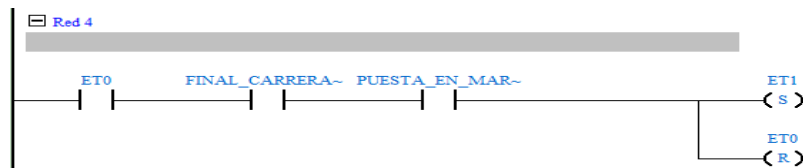
Lógica: **SI** al contacto Paro\_Emergencia le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así se activa (R) que permite desactivar una bobina Set Activar\_Motor previamente activada, se des energiza el motor.

- **Red 3.** Desactivación de la bobina (Set) ET0-




Lógica: **SI** la secuencia de contactos ET1, ET2, ET3, Et4 y ET5 les llega un 1 lógico, **ENTOCES** estos contactos cambian de estado (es decir se abren) y así puede desactivar la bobina (Set) ET0.

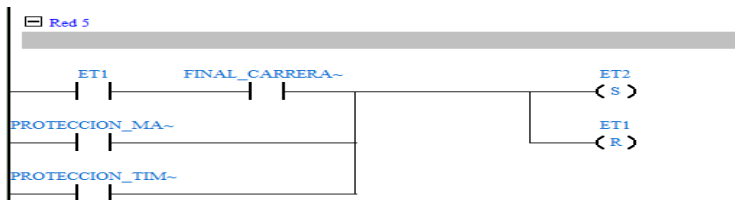
- **Red 4.** Activación de la bobina (S) ET1 y desactivación de la bobina (S) ET0. En la Etapa 0 se inicia cuando el interruptor de posición electromecánico FINAL-CARRERA instalado en la parte superior izquierda del cabezal está en contacto con la barra superior marco de la máquina, para luego activar el motor haciendo mover el tornillo sin fin hacia la derecha, bajando ↓ el cabezal para comprimir la probeta.



Lógica: **SI** a los contactos secuencialmente ET0; Final Carrera y Puesta\_en\_Marcha les llega un 1 lógico, **ENTONCES** estos contactos cambian de estado (es decir se cierran) y así pueden activar de forma

secuencial las bobinas (Set) ET1 y (R) que permite desactivar una bobina Set ET0 previamente activada.

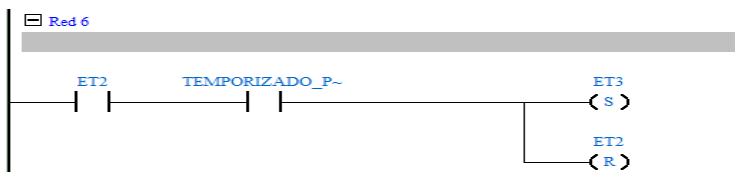
- **Red 5.** En la Etapa 1 se e presenta cuando el motor está funcionando, girando el tornillo sin fin hacia la derecha,  bajando el cabezal y deteniéndose cuando el interruptor de posición electromecánico FINAL\_CARRERA\_ABAJO instalado en la parte inferior de dicho cabezal, hace contacto con la platina base de la celda de carga y/o cuando el material es muy duro, deteniéndose en un tiempo establecido.



Lógica: **SI** a los contactos secuencialmente ET1 y final \_Carrera- les llega un 1 lógico al igual que los contactos Protección\_Ma- y Protección\_Tim- **ENTONCES** estos contactos cambian de estado (es decir se cierran) y así pueden activar de forma secuencial las bobinas (Set) ET2 que permite desactivar una bobina (R) ET1 previamente activada.

El objetivo de dichos sensores es detener el elemento móvil (cabezal) a una determinada posición, evitando daños a la maquina y forzamiento del motor.

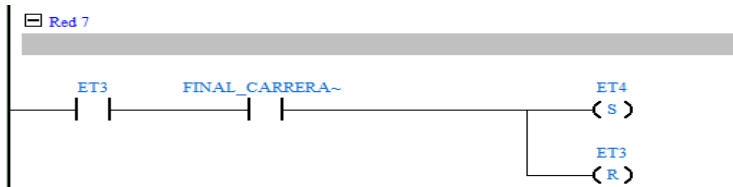
- **Red 6.** Etapa 2. Activación del TEMPORIZADOR\_PARO corresponde a un tiempo de espera, para accionar una nueva etapa, duración 3 segundos



Lógica: **SI** a los contactos secuencialmente ET2 y Temporizador\_P- les llega un 1 lógico, **ENTONCES** estos contactos cambian de estado (es decir se cierran) y así pueden activar de forma secuencial las bobinas (Set) ET3 y (R) que permite desactivar una bobina Set ET2 previamente activada.

Con el objeto de iniciar la descompresión del material probeta, devolviendo el cabezal a su posición inicia (arriba).

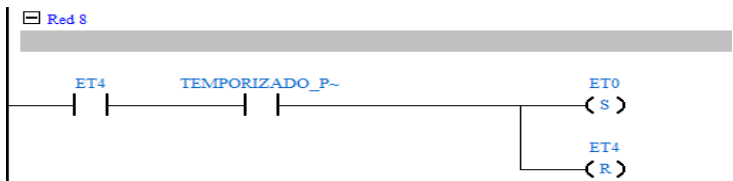
- **Red 7.** Si se activa la ET3, el Sensor FINAL\_CARRERA\_ARRIBA para que el motor invierta su dirección de giro hacia la derecha. ↻



Lógica: Si a los contactos secuencialmente ET3 y Final\_Carrera\_Arriba les llega un 1 lógico, ENTONCES estos contactos cambian de estado (es decir se cierran) y así pueden activar de forma secuencial las bobinas (Set) ET4 y (R) que permite desactivar una bobina Set ET3 previamente activada.

Con el objetivo de bajar ↓ el cabezal, una vez llegue a la parte superior del marco de la máquina.

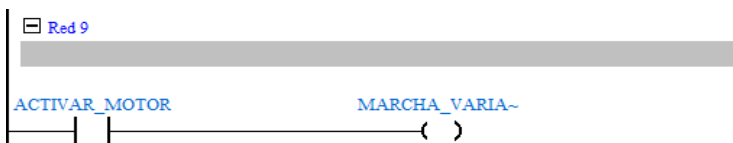
- **Red 8.** Etapa 4 esta activa un TEMPORIZADOR\_PARO para que realice nuevamente una espera, para luego accionar una nueva etapa, de desenraizar el motor, girando su eje hacia la izquierda ↶ devolviendo el cabezal a la ET0, listo para iniciar nuevamente la etapa de compresión.




Lógica: Si los contactos secuencialmente ET4 y Temporizado\_P- les llega un 1 lógico, ENTONCES estos contactos cambian de estado (es decir se cierran) y así pueden activar de forma secuencial las bobinas (Set) ET0 y (R) que permite desactivar una bobina Set ET4 previamente activada

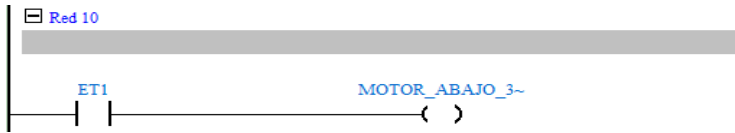
El objetivo es detener el motor, dar una espera para devolver el cabezal a su posición de inicio.

- Red 9.



Lógica: **SI** al contacto Activar\_Motor le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir) se cierra y así se activa la bobina ( ) Marcha Variador- que representa elementos de salida o de variable interna.

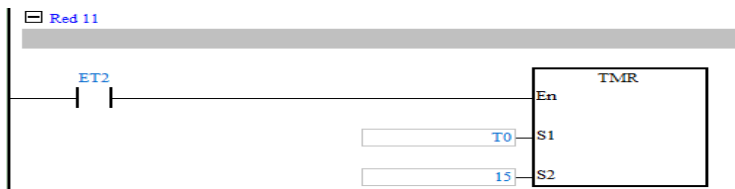
- **Red 10.** Cuando se activa la Etapa 1 el MOTOR\_ABAJO\_3HZ gira el eje del motor  hacia la izquierda, desplazando el cabezal hacia arriba.



Lógica: **SI** al contacto ET1 le llega un 1 lógico, **ENTONES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así se activa la bobina ( ) Motor\_Abajo\_3 que representa elementos de salida o de variable interna.

Con el objetivo de subir el cabezal, hasta que llegue a la parte superior del marco de la máquina.

- **Red 11.** Cuando se activa la Etapa 2, se realiza una pausa de tiempo, (TMR) la bobina del temporizador esta encendida, el temporizador empezará a contar 3 segundos, cuando termine el valor de conteo, se restablecerá a otra etapa.



Lógica: **SI** el contacto ET2 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar el TMR (temporizador) con entrada S1, Tiempo0 que activa el proceso de conteo de tiempo y al detectar flanco de bajada reinicia el contador, y entrada S2 que indica el valor de la temporización (15)

- **Red 12.** Cuando se activa la Etapa 3, se activa el temporizador (TMR) en un lapso de 3 segundos. El objetivo es no hacer corto y proteger el motor, cuando el motor gira en un sentido y se da un comando para girar en el sentido contrario, se da la orden de desenraizar el variador y esperar 3 segundos para atender la nueva acción de giro.

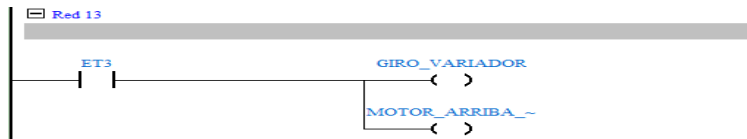


Lógica: **SI** el contacto ET3 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar el TMR (temporizador) con



entrada S1, Tiempo2 que activa el proceso de conteo de tiempo y al detectar flanco de bajada reestablece el contador a su valor inicial, y entrada S2 que indica el valor de la temporización (10)

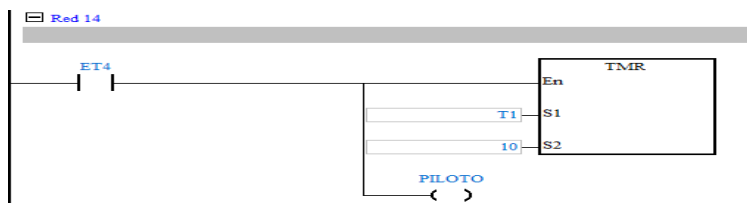
- **Red 13.** Cuando la Etapa 3 esta activa, el estado GIRO\_VARIADOR\_MOTOR\_ ARRIBA.



Lógica: **SI** el contacto ET3 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** estos contactos cambian de estado (es decir se cierran) y así pueden activar de forma secuencial las bobinas ( ) Giro\_Variador y ( )Motor Arriba que representan elementos de salida o de variable interna.

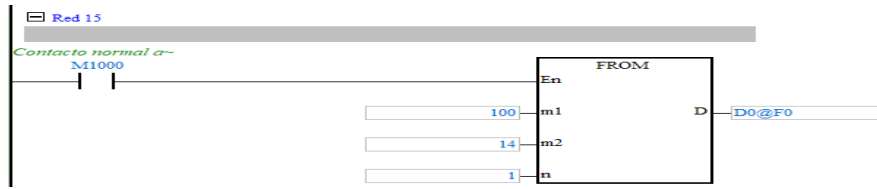
Comando para girar el eje del motor a la derecha. 

- **Red 14.** Cuando la Etapa 4 esta activa se genera una pausa de tiempo (TMR) de un lapso de 3 segundos y enciende un piloto del dispositivo Y4 localizado en el Supervisorio.



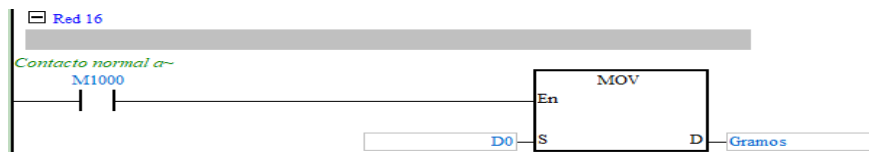
Lógica: **SI** el contacto ET4 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar el TMR (temporizador) con entrada S1, Tiempo1 que activa el proceso de conteo de tiempo y al detectar flanco de bajada reinicia el contador, y entrada S2 que indica el valor de la temporización (10) y como resultado activar un Piloto del dispositivo Y4

- **Red 15.** Corresponde a la configuración de Sensores. Se realiza la configuración del contacto especial M1000 normal abierto y se cierra cuando se está prendido el PLC. Igualmente, se establecen los parámetros de la Celda de Carga donde en la función FROM identifica la ubicación del módulo1, localizado a la izquierda del PLC (100) su conexión al canal(registro 14, y el número de muestras (1), y toda la configuración guardada en la variable D0@Fo.



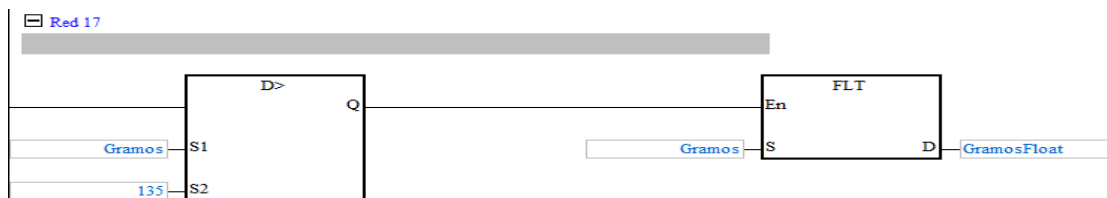
Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función FROM con entrada: medida1: 100 que activa la configuración, entrada de la segunda medida: 14 y tercera medida n: equivalente a 1, calculando por la salida D, la nueva configuración variable D0@F0.

- **Red 16.** Cambio de configuración de la variable D0 en Gramos.



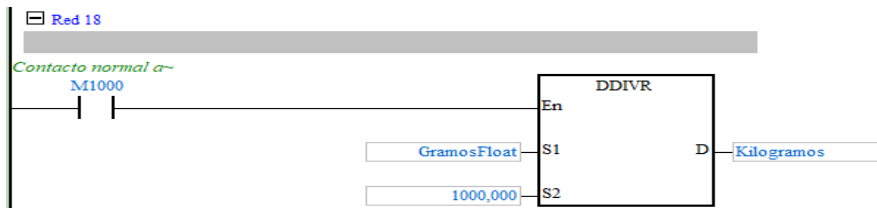
Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así puede activar la función MOV con entrada S: D0 configurando su valor y resultado es guardado en la variable D Gramos.

- **Red 17.** Cambio de configuración de la variable Gramos a Gramos Float



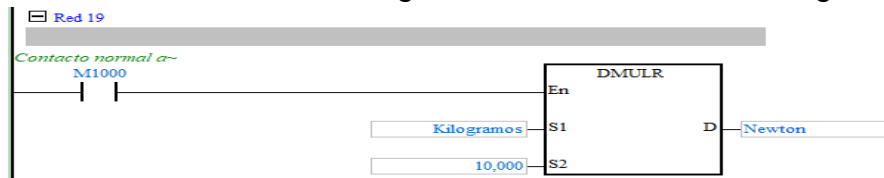
Lógica: **SI** el contacto S1 Gramos y S2 135 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función FLT con entrada S: Gramos configurando su valor en flotante (decimales) y su resultado es guardado en la salida D Gramos Float.

- **Red 18.** Cambio de configuración de la variable GramosFloat a Kilogramos.



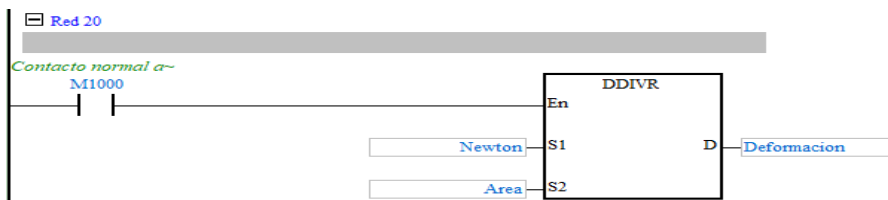
Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función DDIVR con entrada de datos: S1: Gramos Float que activa la configuración y en la segunda entrada de datos: 1000,000 calculado el cociente en la salida D, en kilogramos.

- **Red 19.** Cambio de configuración de la variable Kilogramos a Newton.



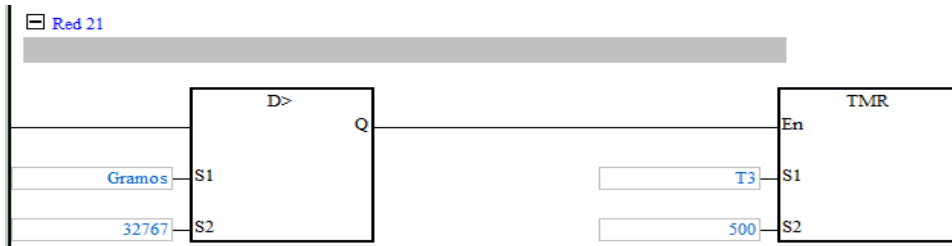
Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función DMULR con entrada de datos: S1: Kilogramos que activa la configuración y en la segunda entrada de datos: S2: 10,000 calculado y entregando un resultado de salida D, en Newton.

**Red.20.** Corresponde a la configuración de Sensores.



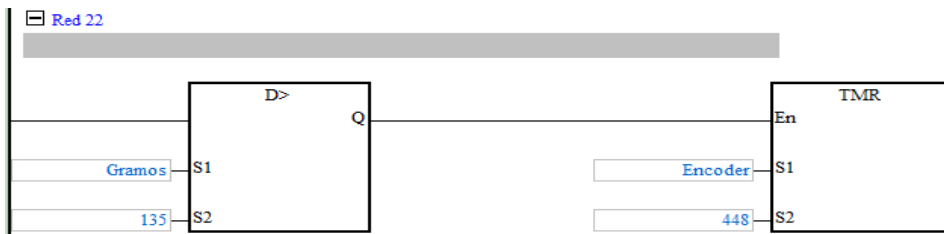
Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función DDIVR con entrada de datos: S1: Newton que activa la configuración y en la segunda entrada de datos: S2: Área calculado el cociente la salida D, el resultado es guardado en la variable D, Deformación.

- **Red 21** Configuración de la función D> y TMR



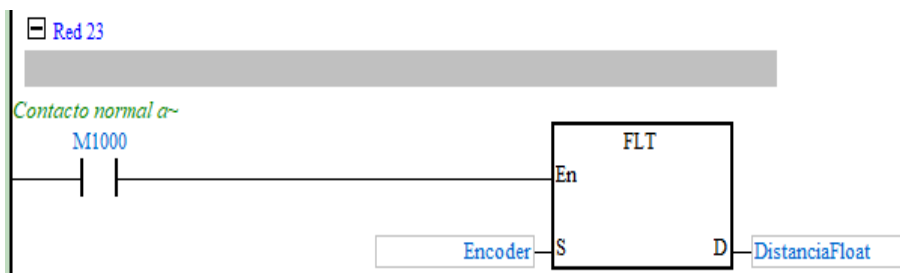
Lógica: **SI** La función D> con entradas S1 en Gramos y S2 32767 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** esta función cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar el TMR (temporizador) con entrada S1, Tiempo3 y entrada S2 en 500 que indica el valor de la temporización.

- **Red 22.** Activación del Encoder.



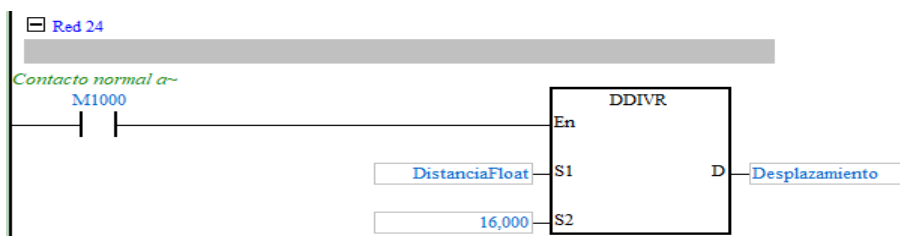
Lógica: **SI** La función D> con entradas S1 en Gramos y S2 135 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** esta función cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar el TMR (temporizador) con entrada S1, Encoder y entrada S2 en 448 que indica el valor de la temporización.

- **Red 23.** Configuración Encoder.



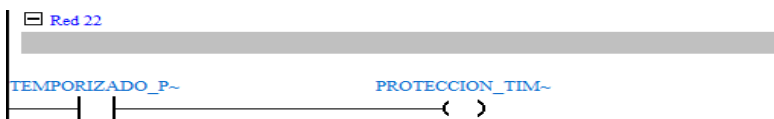
Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función FLT con entrada de datos S Encoder, que activa la salida D, y su resultado es guardado en la variable D, DistanciaFloat.

- **Red 24.** Corresponde a la configuración de sensores



Lógica: **SI** el contacto Marca 1000 le llega un 1 lógico, **ENTONCES** este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así pueden activar la función DDIR con entrada de datos: S1: DistanciaFloat que activa la configuración y en la segunda entrada de datos: S2: 16.000, el cociente es guardado en la variable D, Desplazamiento.

- **Red 25.** Protección



Lógica: Si al contacto Temporizado- le llega un 1 lógico, ENTONCES este contacto cambia de estado (es decir se cierra) y así se activa la bobina ( ) Protección\_Tim- que representa elementos de salida o de variable interna.

## Anexo B Programación del Sistema de Supervisión y Monitoreo

El software que se emplea en el proyecto es el DIAView de DELTA, [72] el cual se implementa como herramienta HMI para la supervisión y monitoreo para MUE por las ventajas que presenta siendo muy utilizado en la industria.

Para entrar al programa DIAView se deben seguir los siguientes pasos:

Se inicia el computador, se hace clic en el icono del programa Development Enviroment para ejecutarlo, como se muestra en la figura siguiente.



## Entrada a la ventana principal

Se ingresa a la ventana principal del entorno de desarrollo del Development Environment, donde se identifica y define su composición, como se muestra en la figura siguiente.



Definición de sus componentes:

1. **Barra de herramientas rápida:** Proporciona botones de uso frecuente para el desarrollo de proyectos.
2. **Barra de menú:** Proporciona varias funciones básicas de operación para el desarrollo de proyectos.
3. **Botones de herramientas:** Botones de acceso directo para comandos operativos.
4. **Caja de herramientas:** Proporciona elementos gráficos básicos de uso frecuente y unidades de control para dibujar.
5. **Galería:** Los elementos gráficos de uso frecuente integrados en el sistema y los contenedores para que los usuarios expandan libremente los gráficos personalizados.
6. **Área del bloc de dibujo:** El área de gestión de proyectos, dibujo y edición de imágenes gráficas.
7. **Ventana del proyecto:** Ventana de visualización de índice de árbol del proyecto; muestra varias composiciones del proyecto y proporciona varios portales para funciones de operación y configuración.
8. **Ventana del navegador de objetos:** Muestra todos los miembros del objeto en la ventana.

9. Ventana de propiedades: Muestra las propiedades del objeto; proporciona un portal operativo para modificar propiedades.

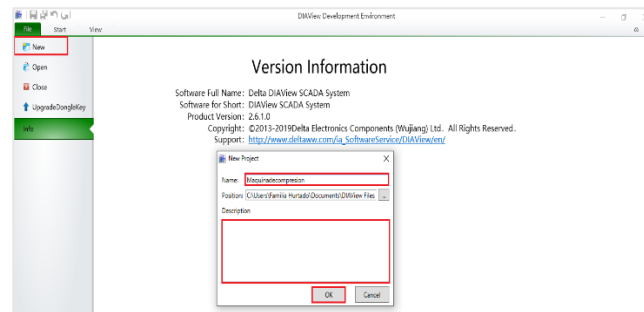
10. Ventana de animación: Portal para configurar animaciones para objetos.

11. Ventana de eventos: Portal para configurar eventos para objetos.

12. Ventana de extensión: Portal para configurar propiedades extendidas para objetos.

## Creación del proyecto

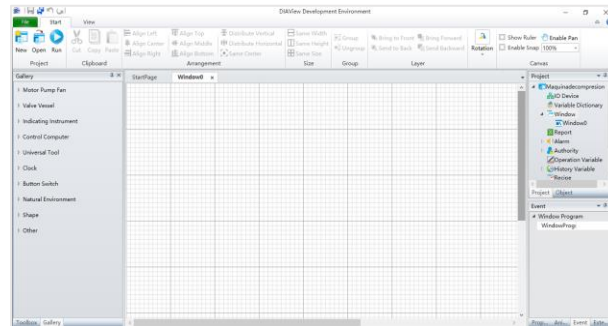
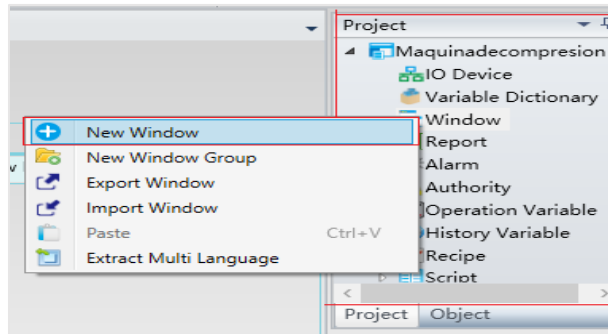
Se selecciona en el menú archivo, y luego se presiona “Nuevo” para agregar un nuevo proyecto, se despliega una ventana para configuración como se muestra en la figura siguiente



El proyecto creado, se presenta en la página de inicio y se agrega en la ventana del proyecto

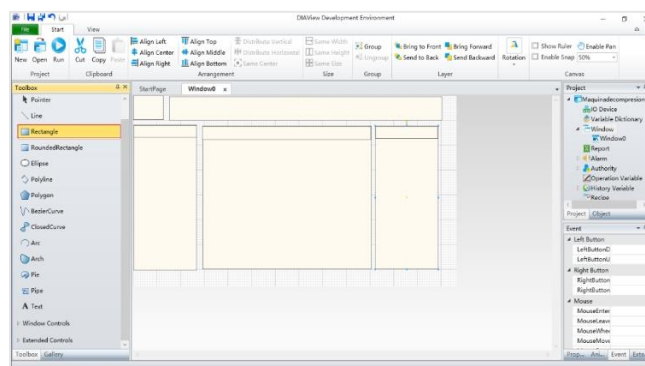
## Generación del área para editar el proyecto

Después de agregar el proyecto, se hace clic derecho en la ventana del “Proyecto” ubicado a la derecha en el índice del árbol de proyecto, se despliega un menú para seleccionar la opción “Nueva Ventana” dando clic, y el sistema crea área que permite dibujar y editar los gráficos del proyecto. Observar las secuencias, como se presenta en las siguientes figuras.



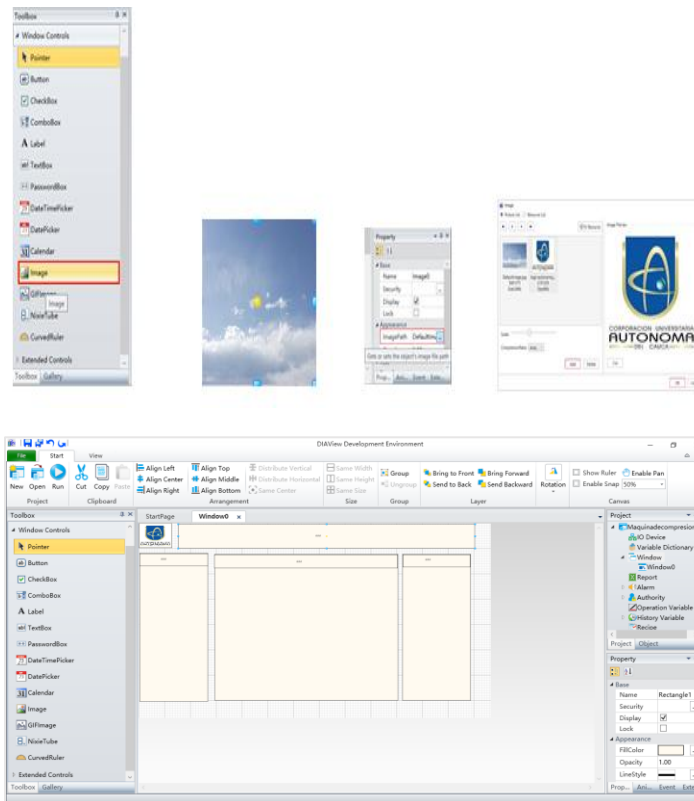
## Generación del grafico del sistema de Control Monitoreo

**Primer paso.** Se diseñan los marcos divisorios con rectángulos, para generar los títulos y los espacios de los diferentes paneles de control y monitoreo, se abre la interfaz de la ventana dando clic en “Caja de herramientas” → “Gráficos básicos” → “Rectángulo” en la ventana de herramientas ubicada a la izquierda. Observar las secuencias, como se muestra en la figura siguiente.

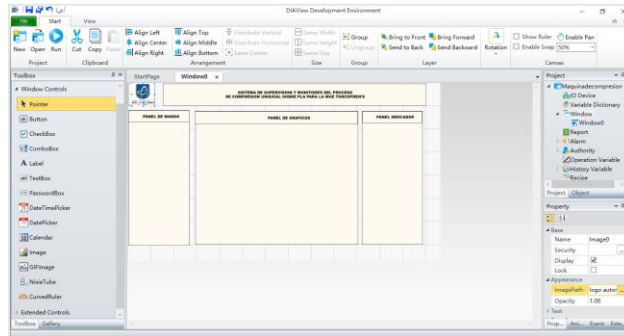
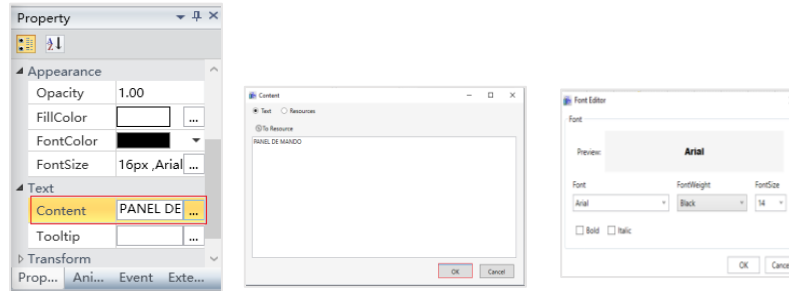




**Segundo paso.** Se inserta la imagen del logo de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, se abre la interfaz de la ventana dando clic en “Caja de herramientas” → “Controles de ventana” → “Imagen” en la ventana de herramientas a la izquierda, se despliega una ventana de “Propiedades” y para insertar la figura se da clic en “ImagePath” y enseguida en el icono (. . .) Posteriormente se despliega una nueva ventana “Imagen” dando clic en “Dirección” llevando nos al Menú donde esta guardada el archivo de imagen, agregándose a la zona de dibujo de la ventana principal. Observar las secuencias, como se muestra en las figuras siguientes.



**Tercer paso.** Se genera el nombre del proyecto y los títulos de los diferentes paneles, se abre la interfaz de la ventana dando clic en “Caja de herramientas” → “Gráficos básicos” → “Etiqueta” en la ventana de herramientas ubicada a la izquierda, posteriormente en la ventana “propiedades” “Contenido”, damos clic en el icono (...) desplegando la ventana para digitar el texto. Regresamos a la ventana de “Propiedades” señalando la casilla “Tamaño de fuente” abriendo una nueva ventana “Editor de fuente” donde se selecciona las características de edición. Observar las secuencias, como se muestran en las figuras siguientes.

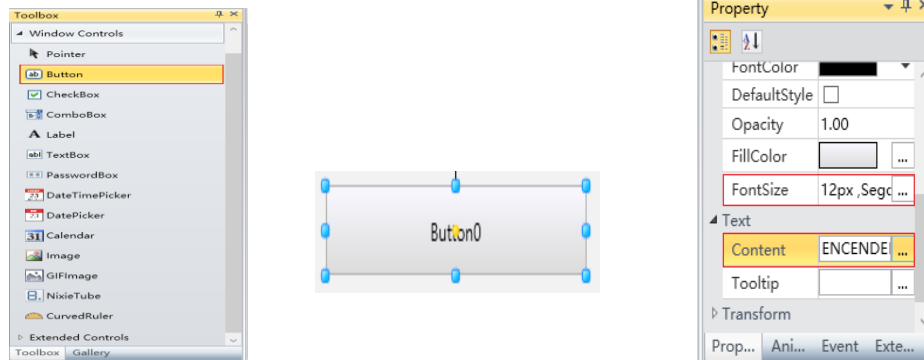


**Cuarto paso.** Generación de “Botón” del PANEL DE MANDO y PANEL INDICADOR.

Se abre la interfaz de ventana dando clic en “Caja de herramientas” → “Controles de ventana” → “Botón” en la ventana de herramientas ubicada a la izquierda, se genera un recuadro “Boton0”. En los puntos de la figura se hace tracción para ajustar el tamaño del gráfico. Posteriormente se abre la ventana “Propiedades” ubicada a la derecha de la pantalla → “Contenido” para digitar el título.

En la casilla “Tamaño de la fuente” (Font Size) se despliega una nueva ventana “editor fuente” donde se selecciona las características de edición. Observar las secuencias como se muestra en las figuras siguientes.

Nota: Para generar un nuevo botón, (Encender variador; Iniciar prueba, Paro de emergencia, Generar Reporte, Encender cámara) simplemente se repite el procedimiento anterior y el sistema en el grafico muestra la secuencia numérica de adición. (Boton1, 2....).



Observar las secuencias, como se muestran en las figuras siguientes

### Botón de Salir

Para insertar botón de ayuda se abre la interfaz de la ventana y hacer clic en “Galería” → “Botón Switch” → ”Out”



### Creación de indicadores

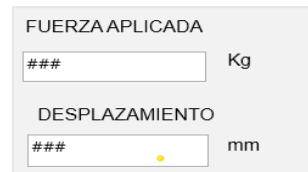
#### Botón Indicador

Para insertar botón Indicador se abre la interfaz de la ventana y hacer clic en “Galería” → “Instrumento Indicador” → ”Tres colores”



#### Caja de texto

Para insertar botón Indicador se abre la interfaz de la ventana y hacer clic en “Caja de herramientas” → “Control de ventana” → ” Caja de texto”

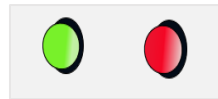


Para insertar botón Indicador se abre la interfaz de la ventana y hacer clic en “Caja de herramientas” → “Control de ventana” → ” Caja de texto.

INGRESAR AREA PLA  
 cm<sup>2</sup>  
 INGRESAR LONGITUD PLA  
 cm

### Indicadores de Luz

Para insertar botón Indicador se abre la interfaz de la ventana y hacer clic en “Galería” → “Instrumento Indicador” → “Indicator Lig” (verde y/o rojo).

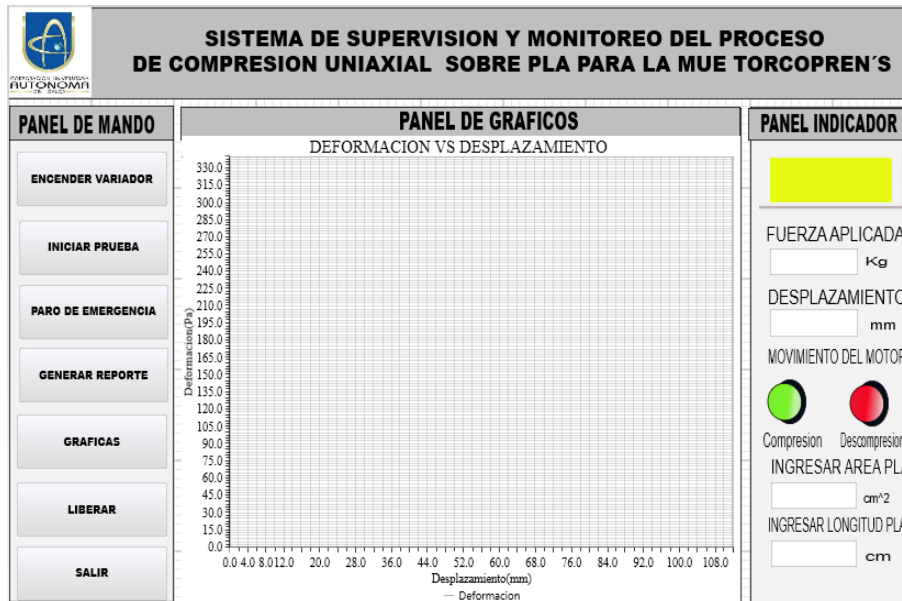


### Botón tipo contacto booleano. LIBERAR

Para insertar botón Indicador se abre la interfaz de la ventana y hacer clic en “Galería” → “Instrumento Indicador” → “Booleano”.



### Grafica del panel de Control

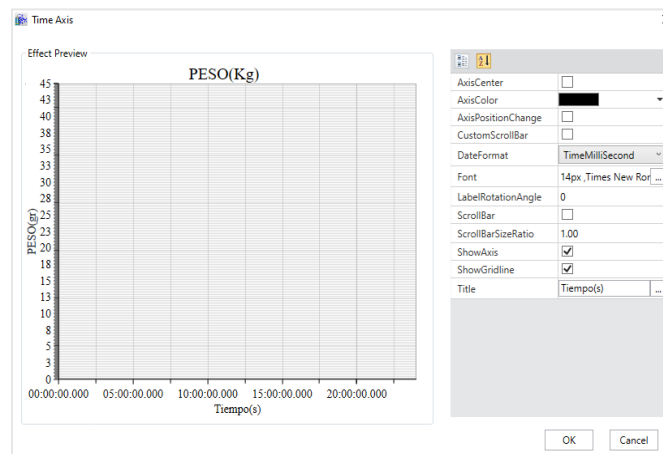


## Introducción de la gráfica

**Primer paso.** Se diseñan los marcos divisorios con rectángulos, para generar los títulos y los espacios de los diferentes paneles de control y monitoreo, se abre la interfaz de la ventana dando clic en “Caja de herramientas” → “Gráficos básicos” → “Rectángulo” en la ventana de herramientas ubicada a la izquierda. Observar las secuencias, como se muestra en la figura siguiente.

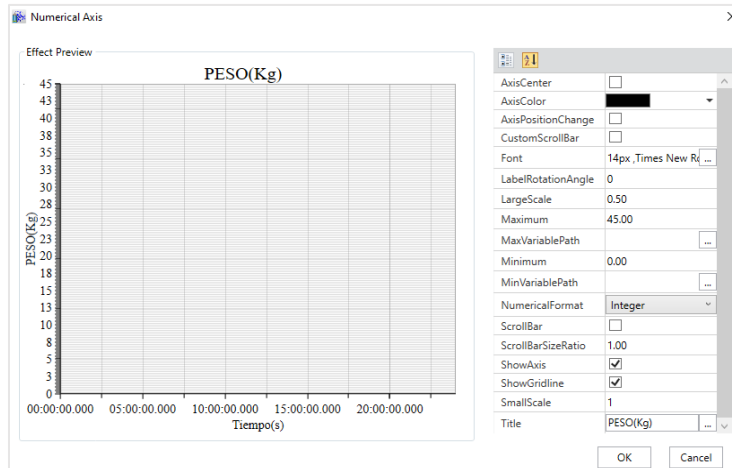
### Configuración eje “X” Tiempo(s)

Se abre la interfaz de la ventana dando clic en “Propiedades” → “Series” → “TimeAxis” en la ventana de herramientas ubicada a la derecha, se coloca el nombre Tiempo(s) en “Title” y clic en “OK” , como se muestra en la figura siguiente.



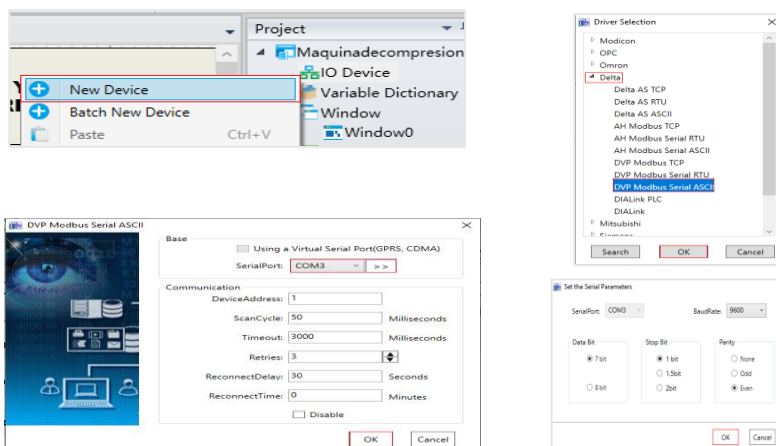
### Configuración eje “Y” Peso Kg

Se abre la interfaz de la ventana dando clic en “Propiedades” → “Series” → “NumericalAxis” en la ventana de herramientas ubicada a la derecha, se coloca el nombre PESO(Kg) en “Title” y clic en “OK” , como se muestra en la figura siguiente.



### Integración del dispositivo DIAView para comunicarse con el PLC

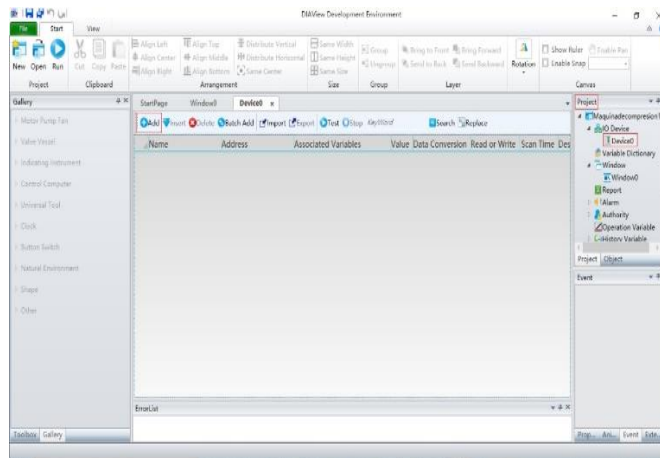
Se ingresa a la ventana principal, dando clic en “Proyecto” → “IO Device” → “New Device”, se abre la ventana → “Driver Selection” → “Delta” → “DVP Modbus Serial ASCII” y clic en OK, desplegando la ventana con el mismo nombre, donde se deben registrar los parámetros de comunicación, igualmente en la casilla “Puerto serie COM3” establecido, se da clic en siguiente >> desplegándose la ventana para establecer los parámetros de serie, dando clic en” OK”. Observar la secuencia, como se observa en las figuras siguientes.



### Creación de Variables

Una vez configurado el dispositivo para comunicarse con el PLC, se generan las variables del proyecto con el fin de mostrar y controlar las acciones en tiempo real. Estas variables personalizadas, son gestionadas por “Diccionario de variables”.

Para su configuración se abre la ventana del “Proyecto” →” Device 0” se despliega una nueva ventana para relacionar las variables en el PLC con los mismos parámetros generadas anteriormente.



## Configuración de las Variables del Proyecto

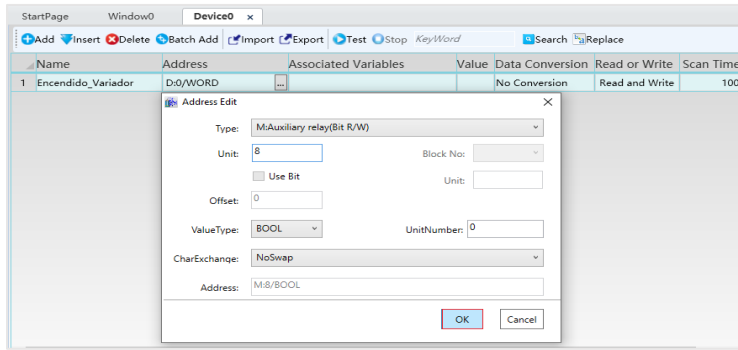
Para configurar las variables, se da clic en “Add” que despliega una ventana para ingresar las características técnicas de la variable, las cuales deben ser similares a las generadas en el PLC.

### Asociación de Variables

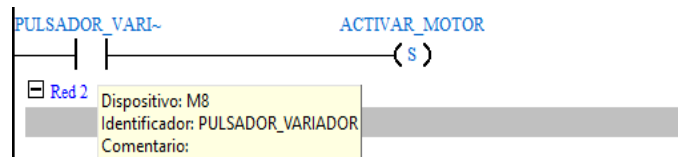
Para asociar cada variable, se abre la ventana “Proyecto” se da clic derecho “Diccionario de Variables” se abre ventana de selección “Nuevo grupo de Variables” se abre la ventana de operación VariableGroup0, con el objeto de dar el ingreso de: Nombre, Tipo de valor, valor inicial, valor remanente, valor mínimo, valor máximo, banda muerta, Dígito decimal, Unidades de ingeniería, Dominio Extendido y Descripción. Para incluir la variable al Diccionario, se regresa a la ventana Device0, se da clic en “Variable asociada” → (...) se despliega el navegador para selección “Variable Dictionary” → “VariableGroup” generándose un cuadro de descripción de la respectiva variable incluida.

Nota. Para asociar una nueva variable, simplemente se repite el procedimiento anterior.

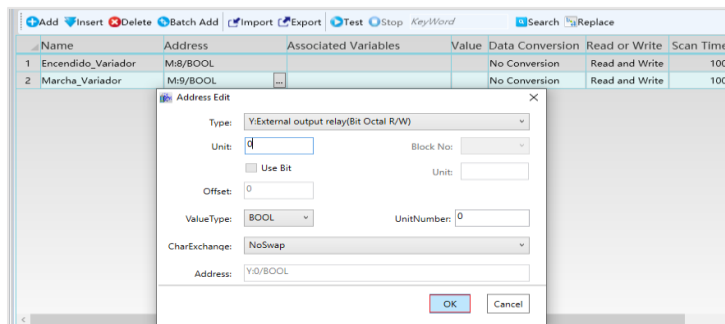
Variable 1.



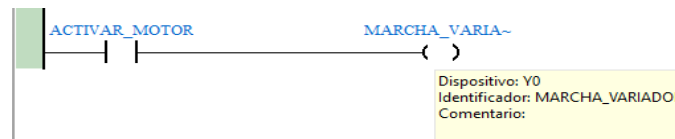
Variable generada en el PLC de la maquina



Variable 2

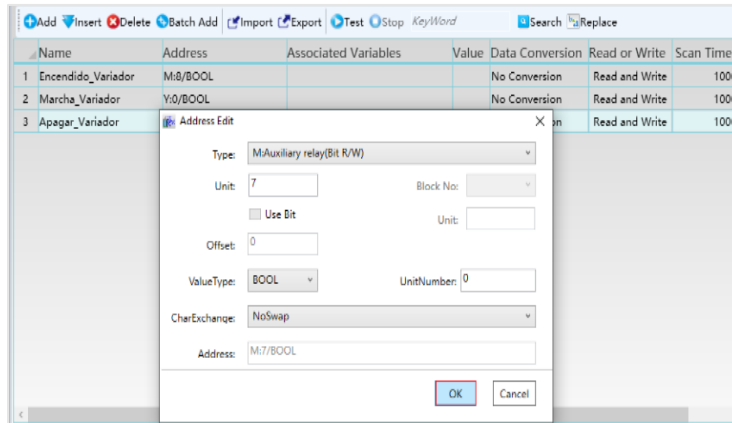


Variable generada en el PLC de la maquina

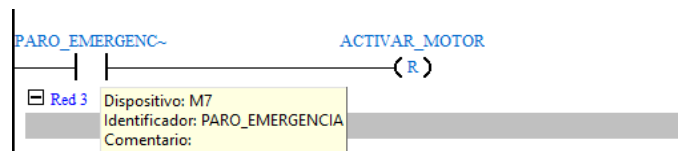


Variable 3

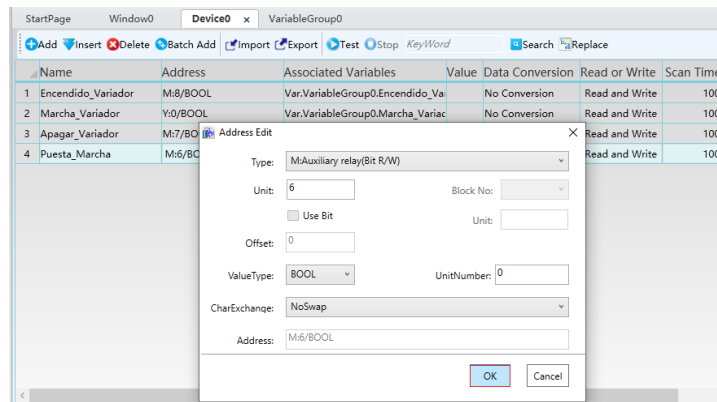




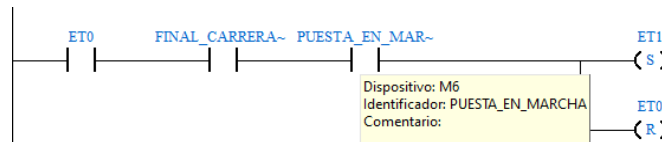
Variable generada en el PLC de la maquina



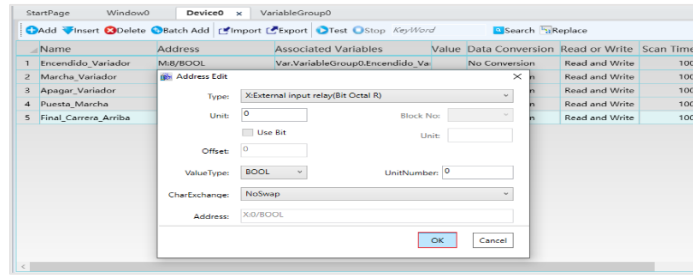
Variable 4



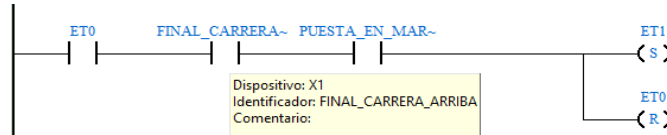
Variable generada en el PLC de la maquina



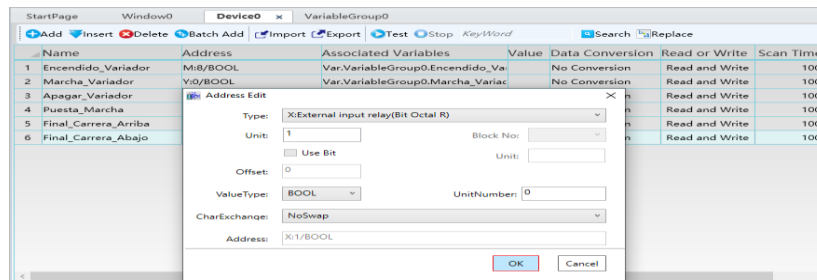
Variable 5



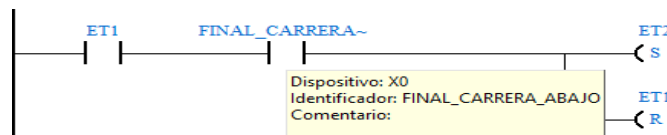
Variable generada en el PLC de la máquina.



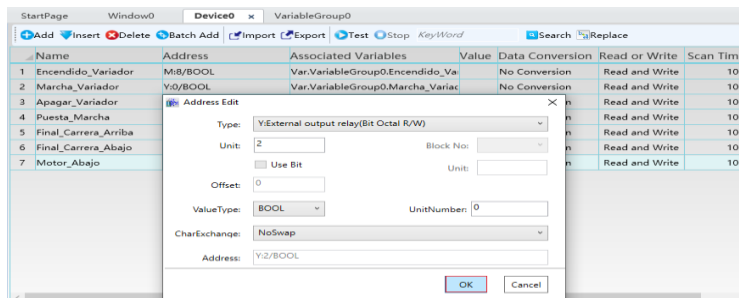
Variable 6



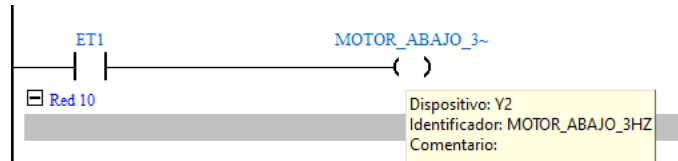
Variable generada en el PLC de la maquina



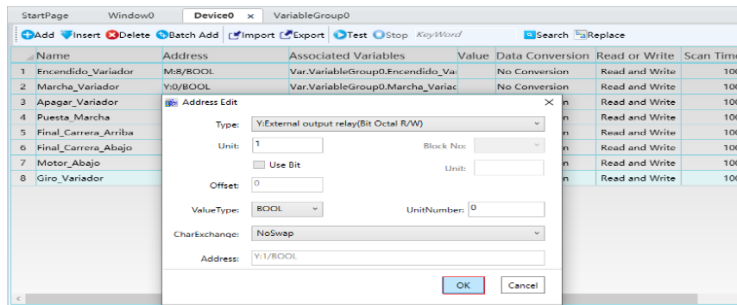
Variable 7



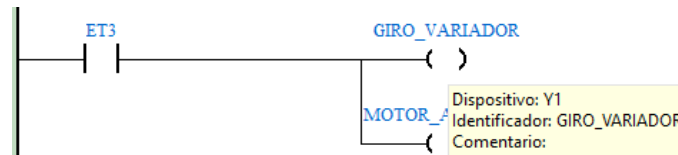
Variable generada en el PLC de la maquina



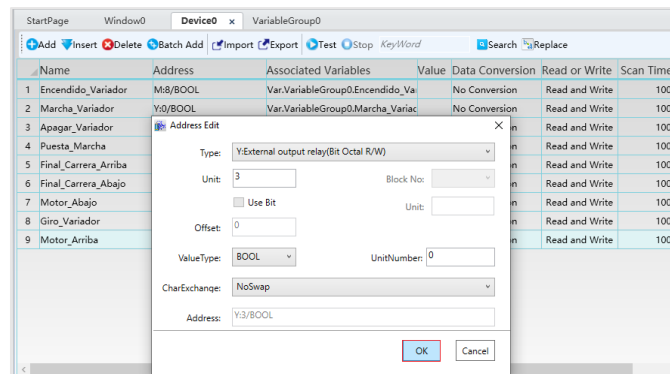
Variable 8



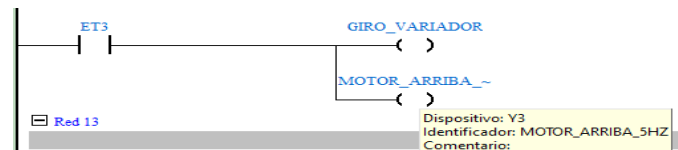
Variable generada en el PLC de la maquina



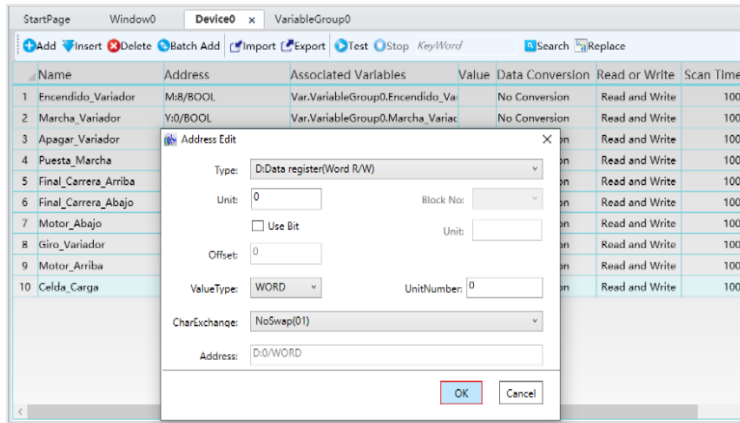
Variable 9



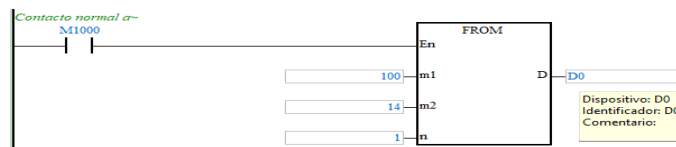
Variable generada en el PLC de la maquina



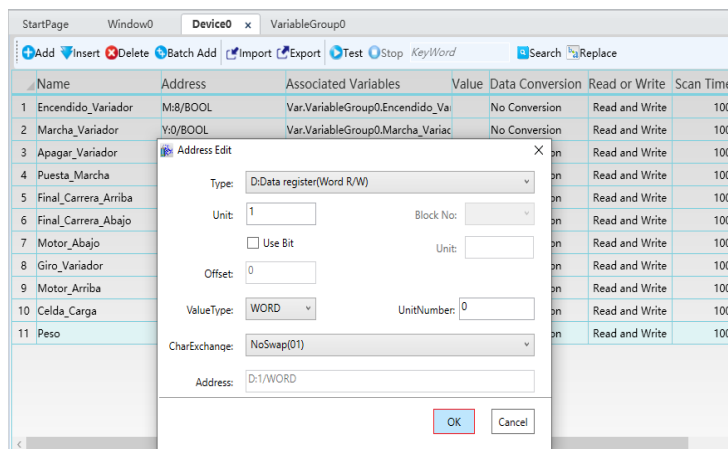
Variable 10



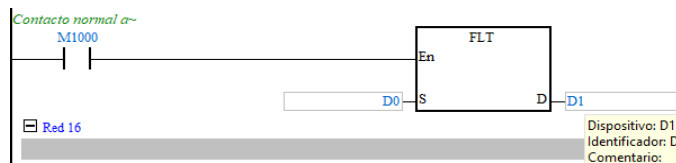
Variable generada en el PLC



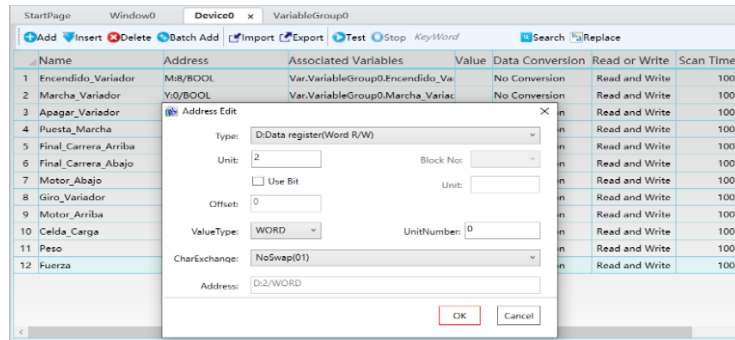
Variable 11



Variable generada en el PLC



Variable 12



Variable generada en el PLC

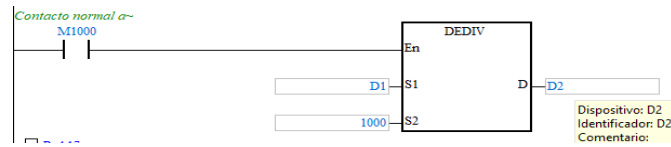


Figura 1. Cuadro resumen de asociación de variables en “VariableGroup”

Name	Variable Type	Initial Value	Retentive Value	Minimum 1	Maximum Value	Deadband	Decimal Digit	Eng Units
2	Marcha_Variador	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
3	Apagar_Variador	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
4	Puesta_Marcha	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
5	Final_Carrera_Arriba	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
6	Final_Carrera_Abajo	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
7	Motor_Abajo	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
8	Giro_Variador	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
9	Motor_Arriba	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
10	Celda_Carga	Analog	0	■	0	10000	0	0 Gramos
11	Fuerza	Analog	0	■	0	10000	0	0 Newtons
12	Deformacion	Analog	0	■	0	10000	0	0 Pascales
13	Area	Analog	0	■	0	100	0	0 Metros Cua
14	Liberar	Digital	False	■	N/A	N/A	N/A	N/A
15	Longitud_PLA	Analog	0	■	0	10000	0	0
16	Desplazamiento	Analog	0	■	0	10000	0	0
17	Area_m	Analog	0	■	0	10000	0	0
18	kilogramos	Analog	0	■	0	10000	0	0

Name	Address	Associated Variables	Value	Data Conversion	Read or Write	Scan Time	Description
1 Encendido_Variador	M:8/BOOL	Var.VariableGroup0.Encendido_Va		No Conversion	Read and Write	1	
2 Marcha_Variador	Y:0/BOOL	Var.VariableGroup0.Marcha_Variac		No Conversion	Read and Write	1	
3 Apagar_Variador	M:7/BOOL	Var.VariableGroup0.Apagar_Variac		No Conversion	Read and Write	1	
4 Puesta_Marcha	M:6/BOOL	Var.VariableGroup0.Puesta_Marcha		No Conversion	Read and Write	1	
5 Final_Carrera_Arriba	X:0/BOOL	Var.VariableGroup0.Final_Carrera_		No Conversion	Read and Write	1	
6 Final_Carrera_Abajo	X:1/BOOL	Var.VariableGroup0.Final_Carrera_		No Conversion	Read and Write	1	
7 Motor_Abajo	Y:2/BOOL	Var.VariableGroup0.Motor_Abajo		No Conversion	Read and Write	1	
8 Giro_Variador	Y:1/BOOL	Var.VariableGroup0.Giro_Variador		No Conversion	Read and Write	1	
9 Motor_Arriba	Y:3/BOOL	Var.VariableGroup0.Motor_Arriba		No Conversion	Read and Write	1	
10 Celda_Carga	D:0/WORD	Var.VariableGroup0.Celda_Carga		No Conversion	Read and Write	1	
11 Fuerza	D:6/FLOAT	Var.VariableGroup0.Fuerza		No Conversion	Read and Write	1	
12 Area	D:9/FLOAT	Var.VariableGroup0.Area		No Conversion	Read and Write	1	
13 Liberar	M:9/BOOL	Var.VariableGroup0.Liberar		No Conversion	Read and Write	1	
14 Desplazamiento	D:18/FLOAT	Var.VariableGroup0.Desplazamien		No Conversion	Read and Write	1	
15 Deformacion	D:12/FLOAT	Var.VariableGroup0.Deformacion		No Conversion	Read and Write	1	
16 Area_m	D:24/FLOAT	Var.VariableGroup0.Area_m		No Conversion	Read and Write	1	
17 kilogramos	D:4/FLOAT	Var.VariableGroup0.kilogramos		No Conversion	Read and Write	1	

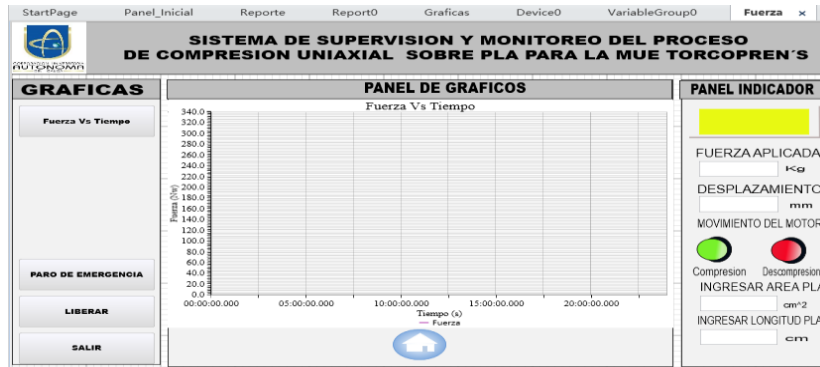
## Configuración de Reportes.

### Reporte 0

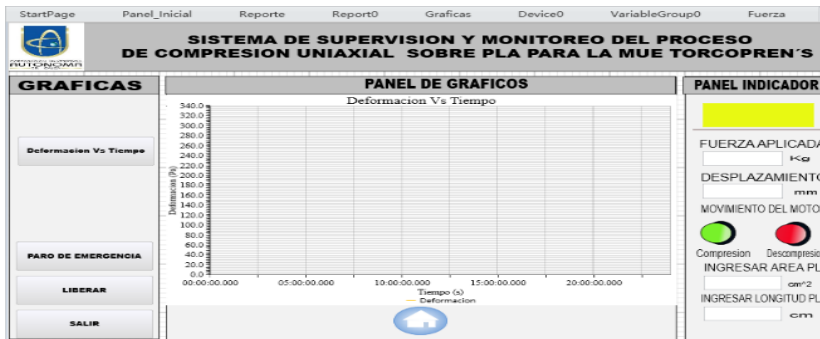
ITEM	Peso (gr)	Peso(Kg)	Fuerza (N)	Area (cm <sup>2</sup> )	Area(m <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Pa)	Longitud PLA (cm)	Deformacion
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								

## Configuración de Graficas

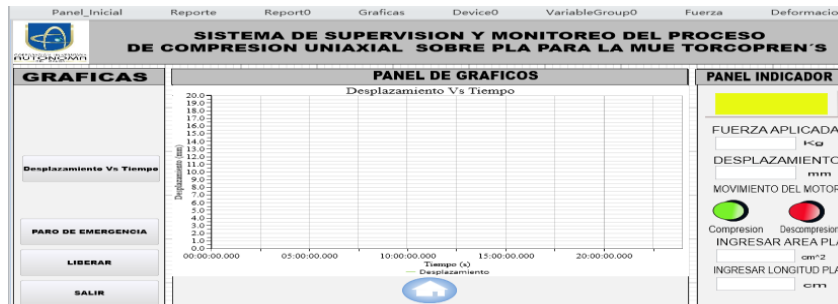
### Fuerza



Deformación



Desplazamiento



Longitud



## Anexo C Graficas Esfuerzo/Deformación ensayos del 3 al 10

### Ensayo 3

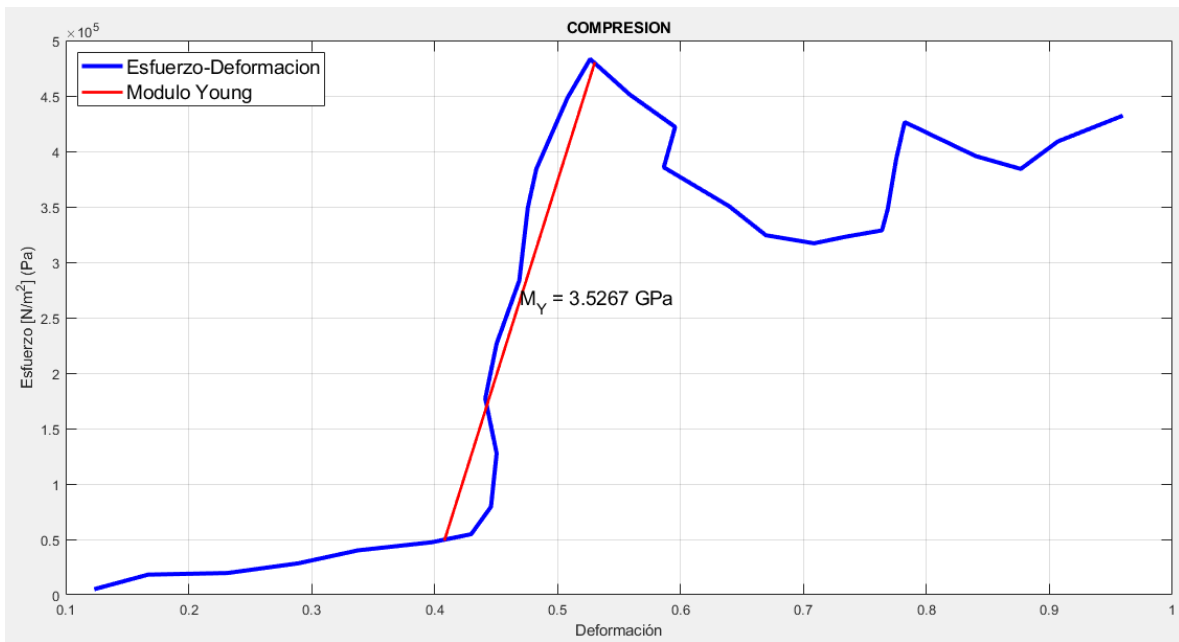


Figura 77. Curva de compresión ensayo 3.

```
|----- RESULTADOS -----|
Modulo de Young = 3.5267 GPa
G_Y = 0.48032 GPa, EcY = 0.5303
G_B = 0.42493 GPa, EcB = 0.78329
G_M = 0.38411 GPa, EcM = 0.87661
```



## Ensayo 4

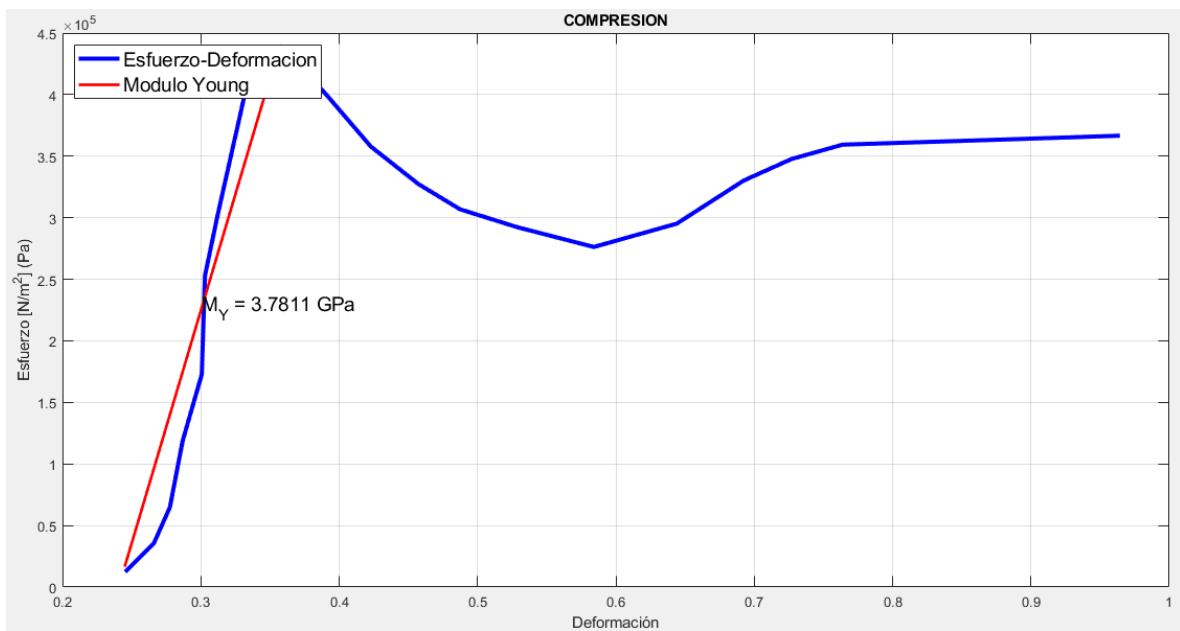


Figura 78. Curva de compresión ensayo 4.

```
|----- RESULTADOS -----|
Modulo de Young = 3.7811 GPa
G_Y = 0.43684 GPa, EcY = 0.35614
G_B = 0.35958 GPa, EcB = 0.76522
G_M = 0.36467 GPa, EcM = 0.96106
```

## Ensayo 5

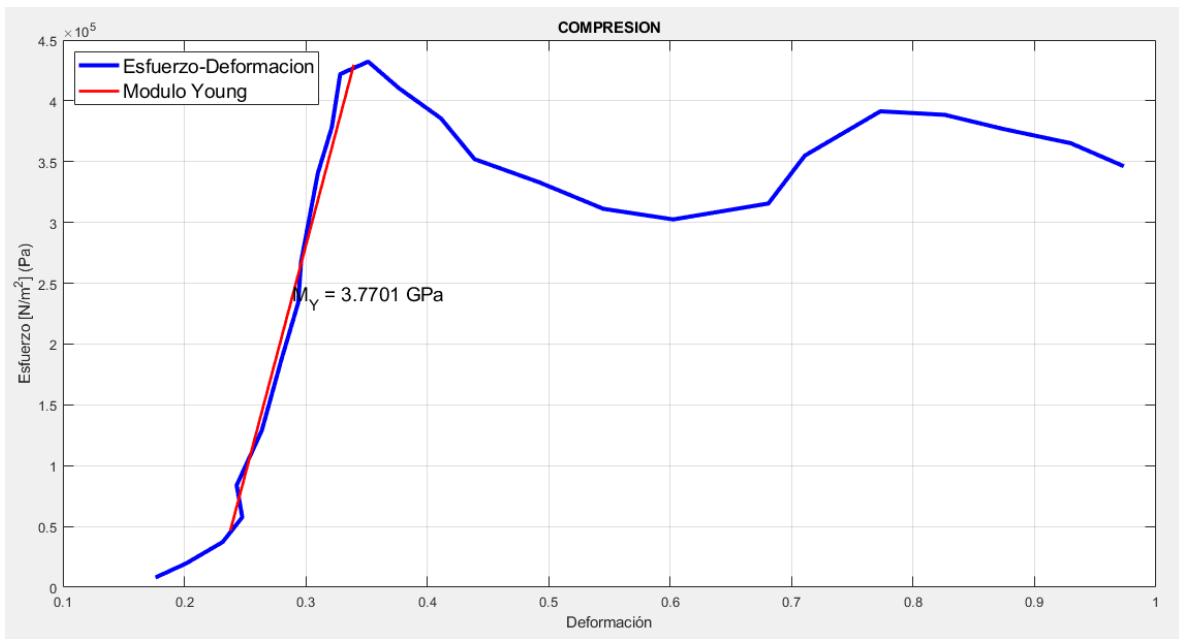


Figura 79. Curva de compresión ensayo 5.

```
|----- RESULTADOS -----|
Modulo de Young = 3.7701 GPa
G_Y = 0.42966 GPa, EcY = 0.33952
G_B = 0.39687 GPa, EcB = 0.77915
G_M = 0.34439 GPa, EcM = 0.97823
```

## Ensayo 6

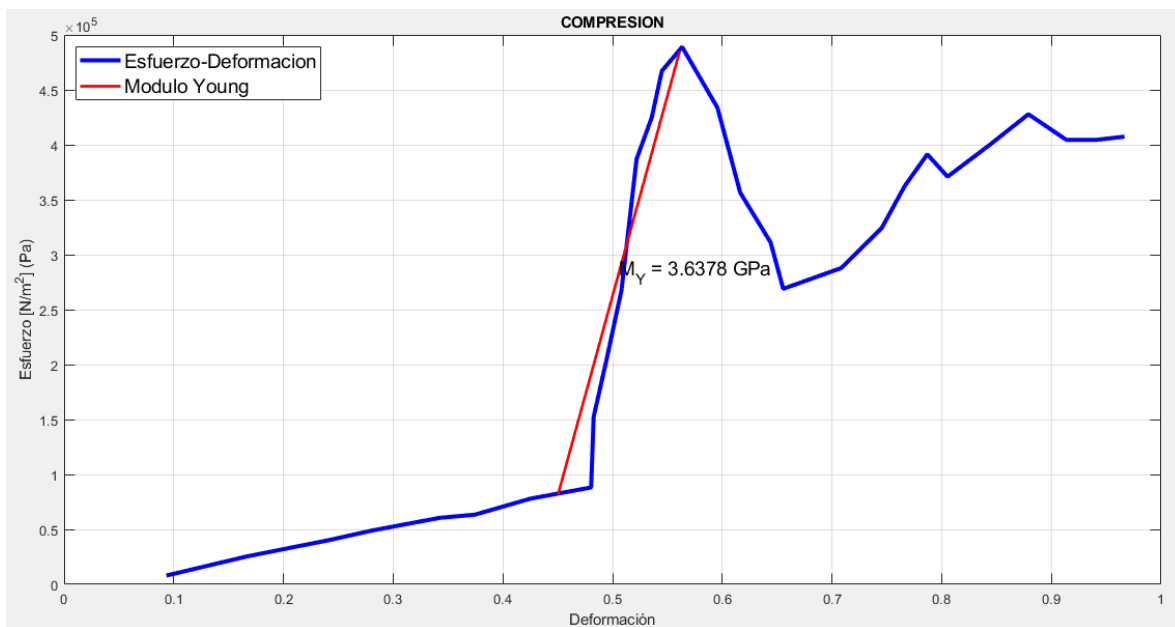


Figura 80. Curva de compresión ensayo 6.

```
|----- RESULTADOS -----|  
Modulo de Young = 3.6378 GPa  
G_Y = 0.48469 GPa, EcY = 0.56106  
G_B = 0.42784 GPa, EcB = 0.87673  
G_M = 0.40452 GPa, EcM = 0.96659
```

## Ensayo 7

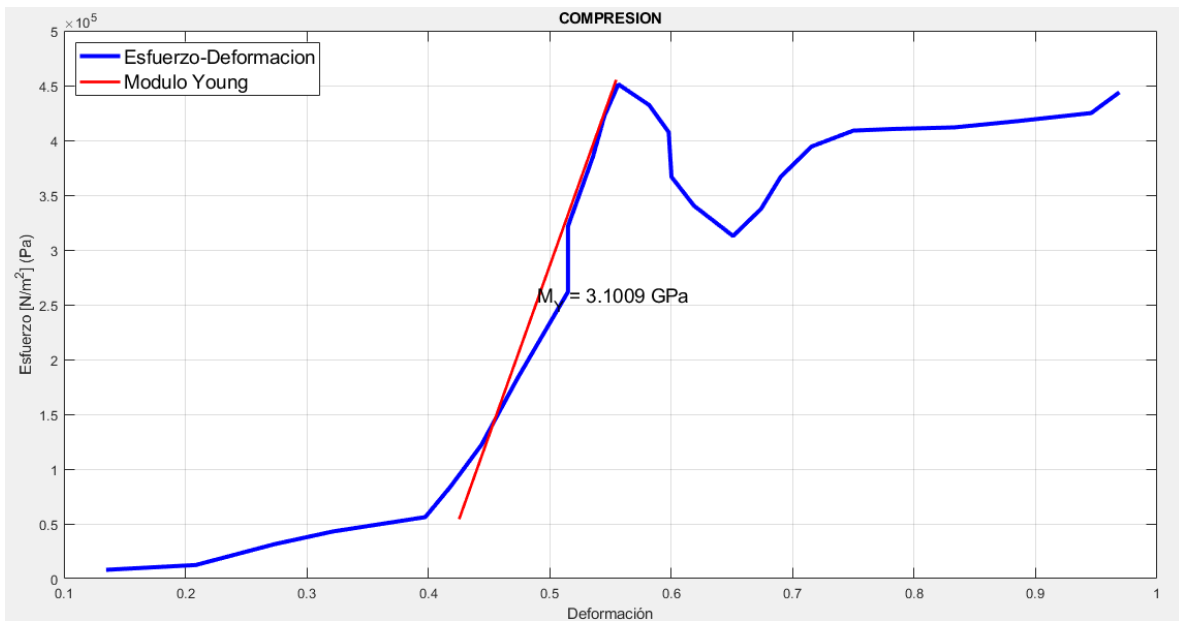


Figura 81. Curva de compresión ensayo 7.

```
|----- RESULTADOS -----|  
Modulo de Young = 3.1009 GPa  
G_Y = 0.45519 GPa, EcY = 0.55468  
G_B = 0.40896 GPa, EcB = 0.75203  
G_M = 0.44387 GPa, EcM = 0.96895
```

## Ensayo 8

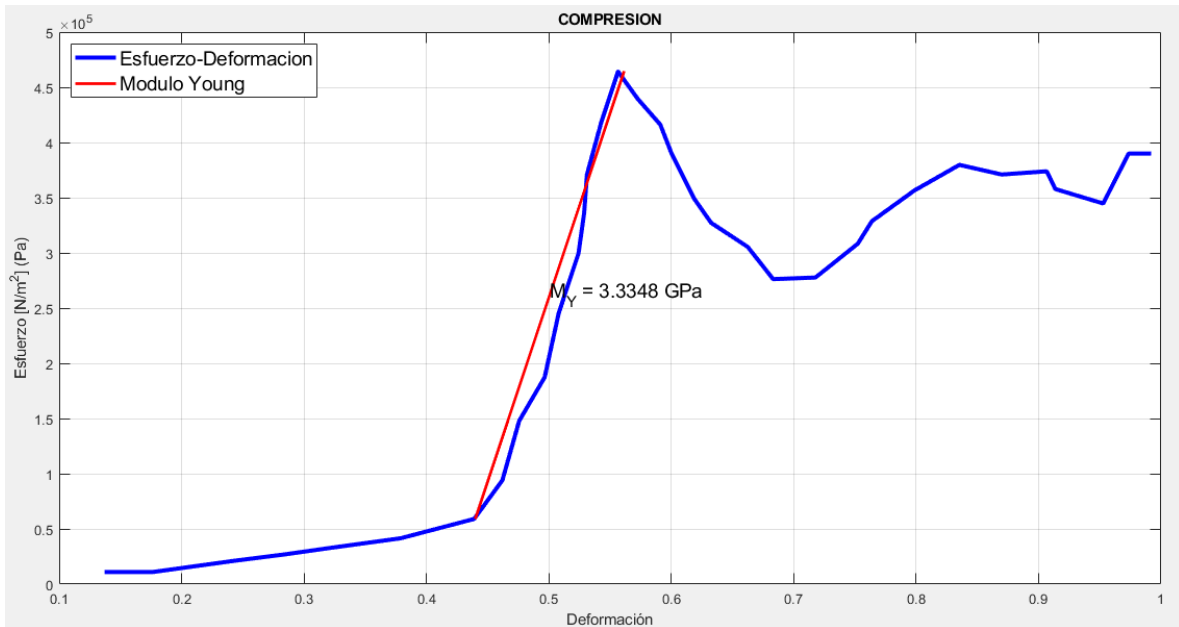


Figura 82. Curva de compresión ensayo 8.

```
|----- RESULTADOS -----|  
Modulo de Young = 3.3348 GPa  
G_Y = 0.46462 GPa, EcY = 0.56148  
G_B = 0.38066 GPa, EcB = 0.8354  
G_M = 0.34575 GPa, EcM = 0.95024
```

## Ensayo 9

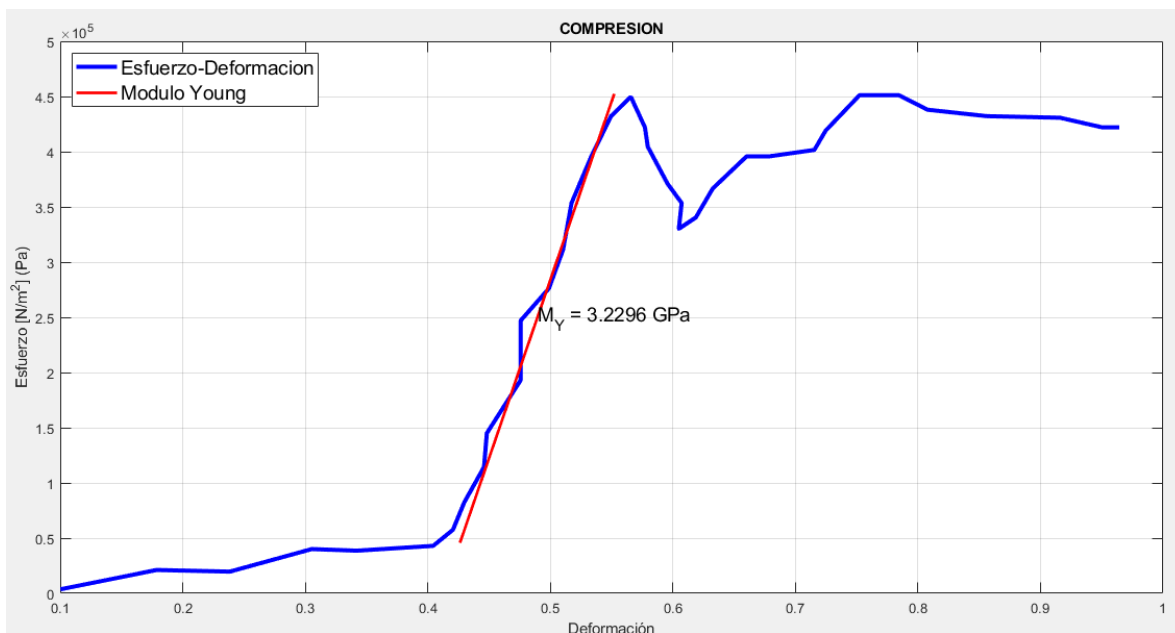


Figura 83. Curva de compresión ensayo 9.

```
|----- RESULTADOS -----|  
Modulo de Young = 3.2296 GPa  
G_Y = 0.45236 GPa, EcY = 0.55213  
G_B = 0.45236 GPa, EcB = 0.76734  
G_M = 0.42028 GPa, EcM = 0.963
```

## Ensayo 10

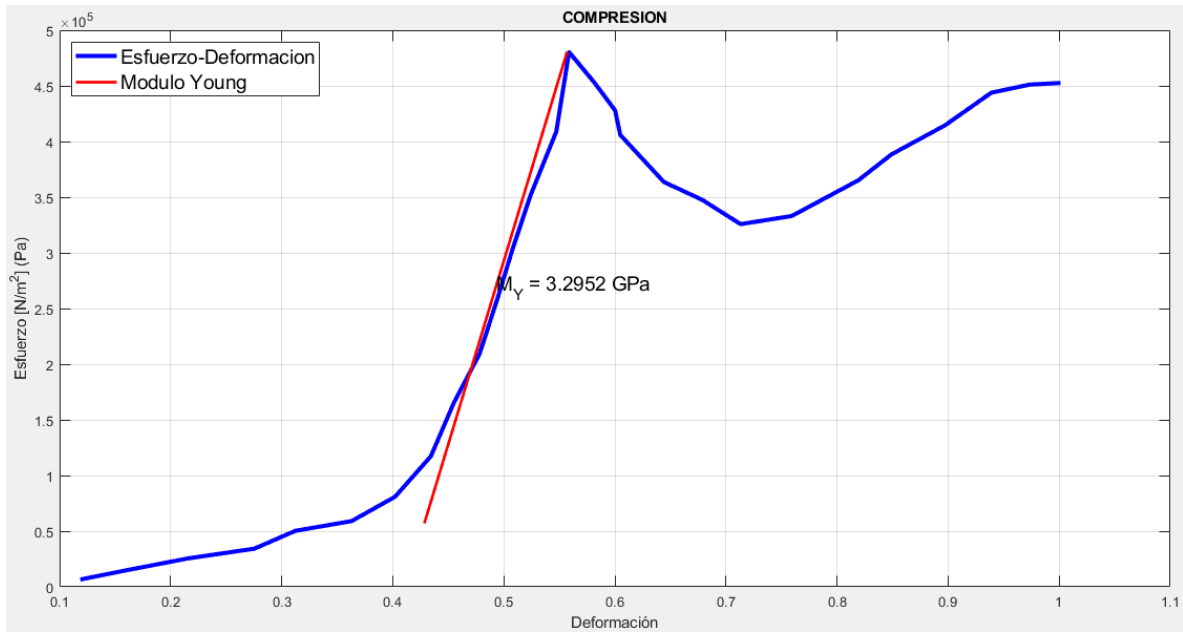


Figura 84. Curva de compresión ensayo 10.

```

|----- RESULTADOS -----|
Modulo de Young = 3.2952 GPa
G_Y = 0.48066 GPa, EcY = 0.55699
G_B = 0.4533 GPa, EcB = 0.99745
G_M = 0.37689 GPa, EcM = 1.0712

```