



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: “MODERNIZACIÓN DEL VIBRÓFORO DE BAJA  
FRECUENCIA E IMPLEMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE  
FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA  
DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS  
ARMADAS – ESPE”**

**AUTORES:**

**ALMEIDA CEVALLOS, BRUNO BLADIMIR  
GARCÍA OJEDA, CRISTIAN ALEXANDER**

**DIRECTOR: ING. PÉREZ, JOSÉ Msc.**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICADO**

Certifico que el trabajo titulado, **“MODERNIZACIÓN DEL VIBRÓFORO DE BAJA FRECUENCIA E IMPLEMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”**, realizado por los señores ALMEIDA CEVALLOS BRUNO BLADIMIR y GARCÍA OJEDA CRISTIAN ALEXANDER, ha sido guiado y revisado en su totalidad, cumpliendo con las normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, por tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores ALMEIDA CEVALLOS BRUNO BLADIMIR y GARCÍA OJEDA CRISTIAN ALEXANDER para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 17 de febrero del 2017

A handwritten signature in purple ink, appearing to read 'Ing. Pérez', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat abstract.

Ing. Pérez, José Msc.  
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Los señores, **ALMEIDA CEVALLOS BRUNO BLADIMIR**, con cédula de ciudadanía N° 1723154199 y **GARCÍA OJEDA CRISTIAN ALEXANDER**, con cédula de ciudadanía N° 1725035784, declaramos que el trabajo de titulación **“MODERNIZACIÓN DEL VIBRÓFORO DE BAJA FRECUENCIA E IMPLEMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 17 de febrero del 2017

Almeida Bruno  
C.C. 1723154199

García Cristian  
C.C. 1725035784



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Los señores, ALMEIDA CEVALLOS BRUNO BLADIMIR y GARCÍA OJEDA CRISTIAN ALEXANDER, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación **“MODERNIZACIÓN DEL VIBRÓFORO DE BAJA FRECUENCIA E IMPLEMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 17 de febrero del 2017

Almeida Bruno  
C.C. 1723154199

García Cristian  
C.C. 1725035784

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres como fruto de su esfuerzo y trabajo constante, que me han ayudado a cumplir esta meta.

**Bruno Almeida C.**

Dedicado a los pilares fundamentales de mi vida, mi Dios y mi Familia. Puedo decir que no fue fácil, pero junto a ellos lo logré.

**Cristian A. García**

## **AGRADECIMIENTO**

A mí a Dios y a la Virgen del Quinche quienes me han llenado de salud, fuerzas y sabiduría para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres que han sido testigos del esfuerzo y sacrificio entregado en toda mi vida académica, que gracias a su fiel ejemplo y constancia han logrado de mí ser un hombre de valores, respetuoso y responsable. Gracias por el amor entregado cada mañana y gracias de corazón por darme la familia que tengo.

A mis hermanos y hermanas por su infinita calidez y amor entregado en cada momento, por sus consejos y palabras de aliento que no me dejaron nunca caer, por las aventuras e historia vividas siempre estarán en mi corazón.

A mi esposa Vane quien es parte vital de mi etapa universitaria, que siempre ha estado con su voz de apoyo incondicional y por mantener siempre firmes mis ideales.

A mis amigos que son los confidentes del sacrificio entregado cada día para atravesar con éxito cada obstáculo que se ha presentado con el único fin de cumplir esta meta. A Cristian quien me ha brindado su confianza y apoyado por con cada uno de sus consejos, muchas gracias.

A aquellos docentes que compartieron sus conocimientos y experiencias y finalmente a esta grandiosa Universidad que me ha visto crecer como profesional.

**Bruno Almeida C.**

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Dios que me dio la fortaleza y la sabiduría para afrontar los momentos de adversidad, gracias a esto estoy aquí y ahora cumpliendo mis metas.

A mis padres que me apoyaron en cada momento. Gracias por enseñarme el valor del trabajo duro y la constancia en todos los aspectos de la vida. Nunca podré agradecerles lo suficiente por todo lo que han hecho por mí y por siempre guiarme por el camino de la rectitud. Gracias por ser los mejores. Los amo.

A mi hermana Jacky y mi cuñado Santiago, por haberme acogido en su hogar como un miembro más de su familia. Gracias por todos los momentos que compartimos y por haberme regalado a mis dos pequeños sobrinos.

A mi hermana Tatiana que con sus palabras de ánimo y consejos me ayudaron a superar los desafíos que se me presentaron en la vida.

A mis amigos que fueron testigos de las largas noches de sacrificio que tuvimos que pasar para cumplir esta meta. Gracias por los buenos momentos compartidos.

A mi novia que fue un apoyo inmenso en los últimos días de mi carrera universitaria.

Y muchas gracias a todas esas personas que ahora forman parte importante de mi vida. Gracias por estar junto a mí.

**Cristian A. García**

## TABLA DE CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| CERTIFICADO.....   | ii   |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....                                 | iii  |
| AUTORIZACIÓN.....  | iv   |
| DEDICATORIA .....  | v    |
| AGRADECIMIENTO .....   | vi   |
| TABLA DE CONTENIDO .....   | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS .....   | xii  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....   | xiii |
| RESUMEN.....   | xvi  |
| ABSTRACT.....  | xvii |
| CAPÍTULO I.....  | 1    |
| GENERALIDADES .....  | 1    |
| 1.1. INTRODUCCIÓN.....   | 1    |
| 1.2. ANTECEDENTES.....   | 1    |
| 1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....                               | 1    |
| 1.4. OBJETIVOS .....   | 2    |
| 1.4.1. General.....  | 2    |
| 1.4.2. Específicos .....   | 2    |
| 1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO .....              | 3    |
| 1.6. ALCANCE DEL PROYECTO.....                                   | 4    |
| 1.6.1. Componentes Mecánicos .....                               | 4    |
| 1.6.2. Componentes Electrónicos/Eléctricos .....                 | 6    |
| 1.6.3. Componentes del Sistema de Control .....                  | 6    |
| 1.6.4. Software para Implementación, Análisis y Simulación ..... | 7    |
| CAPÍTULO II.....   | 8    |
| MARCO TEÓRICO .....  | 8    |
| 2.1. FLEXIÓN EN VIGAS.....                                       | 8    |
| 2.1.1. Vigas .....   | 8    |
| 2.1.1.1. Vigas isostáticas: .....                                | 8    |
| 2.1.1.2. Vigas hiperestáticas.....                               | 9    |
| 2.1.2. Deflexión en viga simplemente apoyada.....                | 10   |



|   |    |
|---|----|
| 2.1.3. Vigas de dos materiales .....  | 11 |
| 2.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD O MÓDULO DE YOUNG .....  | 13 |
| 2.2.1. Ley de Hooke .....   | 14 |
| 2.3. MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL.....  | 14 |
| 2.4. MOMENTO FLECTOR .....  | 15 |
| 2.5. ANÁLISIS DE GRAFICA FLEXIÓN DE VIGAS.....  | 15 |
| 2.5.1. Gráfica.....   | 16 |
| 2.6. AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA .....   | 16 |
| 2.6.1. Objetivos de la automatización .....   | 17 |
| 2.6.2. Instrumentación mecatrónica .....  | 18 |
| 2.7. PROGRAMACIÓN DE CONTROLADORES AUTÓMATAS .....  | 23 |
| 2.7.1. Controladores.....   | 23 |
| 2.8. SISTEMAS HIDRÁULICOS .....   | 25 |
| 2.9. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS .....   | 26 |
| 2.9.1. PC con tarjetas de adquisición de datos .....  | 26 |
| 2.9.2. Señales .....  | 27 |
| 2.9.3. Software .....   | 29 |
| 2.10. COMPONENTES DE LA MAQUINA.....  | 30 |
| 2.10.1. Vibróforo.....  | 30 |
| 2.10.2. Marco de carga .....  | 31 |
| 2.10.3. Actuadores .....  | 32 |
| CAPÍTULO III .....  | 33 |
| ESTADO ACTUAL DE LA MÁQUINA .....   | 33 |
| 3.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MÁQUINA.....   | 33 |
| 3.2. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LA MÁQUINA .....   | 36 |
| 3.2.1. Sistema de instrumentación .....   | 36 |
| 3.2.2. Transferencia y visualización de datos.....  | 38 |
| 3.2.3. Elementos de control y fuerza.....   | 39 |
| 3.2.4. Estructura de apoyo para vigas.....  | 39 |
| 3.3. EVALUACIÓN FINAL DE LA MÁQUINA.....  | 39 |
| CAPÍTULO IV.....  | 41 |
| DISEÑO, SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS<br>MECÁNICO, ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO ..... | 41 |
| 4.1. DISEÑO DE COMPONENTES MECÁNICOS .....  | 41 |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| 4.1.1.   | Diseño de matrimonio eje motor .....  | 41  |
| 4.1.2.   | Diseño de la base del motor.....  | 57  |
| 4.1.3.   | Construcción del tablero sobre mesa .....   | 60  |
| 4.2.   | DISEÑO DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL .....                                | 61  |
| 4.2.1.   | Selección del PLC .....   | 62  |
| 4.3.   | DISEÑO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y<br>ELECTRÓNICOS .....                          | 66  |
| 4.3.1.   | Diseño de circuito analog input .....   | 66  |
| 4.3.2.   | Diseño de secuencia de motor a pasos .....  | 68  |
| 4.3.3.   | Driver Xinje DP-508.....  | 69  |
| 4.3.4.   | Diseño de módulo de modulo para activación en nivel bajo y<br>alto efectivo ..... | 73  |
| 4.3.5.   | Emisor de pulsos para configuración de driver .....                               | 73  |
| 4.3.6.   | Diseño de elementos de protección .....   | 75  |
| 4.4.   | DISEÑO DEL SOFTWARE .....   | 77  |
| 4.4.1.   | Adquisición y procesamiento de datos .....  | 77  |
| 4.4.2.   | Diseño del Software HMI.....  | 89  |
| CAPITULO V.....                                  |   | 107 |
| PRUEBAS, RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL EQUIPO..... |   | 107 |
| 5.1.   | FLEXIÓN EN VIGA DE PINO .....   | 107 |
| 5.1.1.   | Propiedades mecánicas del pino.....   | 107 |
| 5.1.2.   | Ensayo de flexión en viga de pino.....  | 108 |
| 5.2.   | ENSAYO EN VIGA DOS MATERIALES .....   | 111 |
| 5.2.1.   | Propiedades mecánicas de los materiales .....                                     | 111 |
| 5.2.2.   | Ensayo de flexión en vigas de dos materiales .....                                | 111 |
| 5.3.   | FLEXIÓN EN VIGA DE LAUREL .....   | 117 |
| 5.3.1.   | Propiedades mecánicas: .....  | 117 |
| 5.3.2.   | Ensayo de flexión en viga de pino.....  | 117 |
| 5.4  | FLEXIÓN EN VIGA DE BAMBÚ .....  | 120 |
| 5.3.1.   | Propiedades mecánicas: .....  | 120 |
| 5.3.2.   | Ensayo de flexión en viga de pino.....  | 120 |
| CAPITULO VI.....                                 |   | 124 |
| ANÁLISIS ECONÓMICO .....                         |   | 124 |
| 6.1.   | COSTOS DE MATERIA PRIMA .....   | 124 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.2. COSTOS DE MATERIALES MECÁNICOS, ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS .....        | 125 |
| 6.3. COSTOS DE MATERIALES PARA ARMADO DE TABLERO Y MÓDULOS .....            | 126 |
| 6.4. COSTOS DE LOS PROCESOS UTILIZADOS PARA CONSTRUCCIÓN DE ACCESORIOS..... | 127 |
| 6.5. COSTOS DE MANO DE OBRA.....  | 127 |
| 6.6. COSTO TOTAL DEL PROYECTO .....   | 128 |
| CAPITULO VII.....   | 129 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 129 |
| 7.1 CONCLUSIONES.....   | 129 |
| 7.2 RECOMENDACIONES.....  | 131 |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 133 |
| ANEXOS.....   | 135 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| <b>Tabla 1</b>  | Características técnicas del Vibróforo de baja frecuencia ..... | 33  |
| <b>Tabla 2</b>  | Elementos constitutivos de mayor relevancia de la maquina ..... | 35  |
| <b>Tabla 3</b>  | Elementos del sistema de adquisición de datos .....             | 35  |
| <b>Tabla 4</b>  | Evaluación de los elementos constitutivos .....                 | 40  |
| <b>Tabla 5</b>  | Evaluación de los elementos del sistema de adquisición de datos | 40  |
| <b>Tabla 6</b>  | Características del motor seleccionado .....                    | 46  |
| <b>Tabla 7</b>  | Lista de materiales para acoples .....                          | 50  |
| <b>Tabla 8</b>  | Datos del torque de diseño del acople .....                     | 51  |
| <b>Tabla 9</b>  | Codificación para acoples.....                                  | 52  |
| <b>Tabla 10</b> | Características PLC S7 1200 .....                               | 63  |
| <b>Tabla 11</b> | Secuencia de giro de motor a pasos .....                        | 69  |
| <b>Tabla 12</b> | Características de funcionamiento del driver .....              | 69  |
| <b>Tabla 13</b> | Descripción de terminales de señales de control .....           | 70  |
| <b>Tabla 14</b> | Descripción de terminales del circuito de potencia .....        | 72  |
| <b>Tabla 15</b> | Intensidad de corriente máxima en cables conductores .....      | 76  |
| <b>Tabla 16</b> | Valores nominales de fusibles comerciales .....                 | 77  |
| <b>Tabla 17</b> | Características de funcionamiento de la celda de carga .....    | 79  |
| <b>Tabla 18</b> | Características de funcionamiento de LVDT RDP ACT2000C ....     | 80  |
| <b>Tabla 19</b> | Características de funcionamiento de LVDT RDP ACT4000C ....     | 80  |
| <b>Tabla 20</b> | Muestras de datos de desplazamiento lineal.....                 | 83  |
| <b>Tabla 21</b> | Calibración de celda de carga .....                             | 85  |
| <b>Tabla 22</b> | Costos de materia prima.....                                    | 124 |
| <b>Tabla 23</b> | Costos de materiales mecánicos, eléctricos y electrónicos ..... | 125 |
| <b>Tabla 24</b> | Costos de materiales para armado de tablero y módulos.....      | 126 |
| <b>Tabla 25</b> | Costos de procesos utilizados para construcción de accesorios   | 127 |
| <b>Tabla 26</b> | Costos de mano de obra .....                                    | 127 |
| <b>Tabla 27</b> | Costo total del proyecto .....                                  | 128 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |           |
|--|-----------|
| Figura 1 Viga simplemente apoyada.....                                   | 8         |
| Figura 2 Viga en voladizo .....  | 9         |
| Figura 3 Viga empotrada .....  | 9         |
| Figura 4 Viga empotrada y apoyada .....                                  | 9         |
| Figura 5 Viga simplemente apoya con carga puntual .....                  | 10        |
| Figura 6 Sección transversal de una viga de dos materiales .....         | 11        |
| Figura 7 Fibras superiores a compresión e inferiores a tracción. ....    | 12        |
| Figura 8 Sección transversal equivalente .....                           | 13        |
| Figura 9 Centroide .....   | 15        |
| Figura 10 Esfuerzo Vs Deformación .....                                  | 16        |
| Figura 11 Esquema eléctrico del sensor resistivo.....                    | 19        |
| Figura 12 Esquema físico de un sensor resistivo.....                     | 19        |
| Figura 13 Estructura interna de un LVDT .....                            | 20        |
| Figura 14 Esquema de funcionamiento de un de un LVDT .....               | 20        |
| Figura 15 Puente de Wheatstone .....                                     | 21        |
| Figura 16 Celda de carga tipo S .....                                    | 22        |
| Figura 17 PLC Siemens S7-1200 .....                                      | 24        |
| Figura 18 Esquema de la estructura de un microcontrolador .....          | 24        |
| Figura 19 Circuito Hidráulico.....                                       | 26        |
| Figura 20 Partes de un sistema DAQ .....                                 | 27        |
| Figura 21 Señal Anlógica de Voltaje .....                                | 28        |
| Figura 22 Señal Digital de Voltaje.....                                  | 28        |
| Figura 23 Datalogger RDP Modular 600 .....                               | 29        |
| Figura 24 Vibróforo de baja frecuencia .....                             | 31        |
| Figura 25 Pórtico de carga del Vibróforo de baja frecuencia .....        | 32        |
| Figura 26 Diagrama del sistema hidráulico .....                          | 34        |
| Figura 27 Acoplamiento de los sensores LVDT a los soportes de vigas .... | 37        |
| Figura 28 Acoplamiento de la celda de carga al extremo del pistón .....  | 37        |
| Figura 29 Sensores análogos de presión .....                             | 38        |
| Figura 30 Sistema de adquisición de datos .....                          | 38        |
| Figura 31 Medición de torque en eje transmitido .....                    | 42        |
| Figura 32 Motor a pasos seleccionado .....                               | 46        |
| Figura 33 Acople eje-motor con ajuste prisionero.....                    | 47        |
| <i>Figura 34 Factores de diseño para acoples.....</i>                    | <i>48</i> |
| Figura 35 Sujeción con prisioneros.....                                  | 53        |
| Figura 36 DCG del Prisionero .....                                       | 54        |
| Figura 37 Base del motor.....  | 57        |
| Figura 38 Corte de plancha de acero.....                                 | 58        |
| Figura 39 Coeficiente de seguridad .....                                 | 58        |
| Figura 40 Combinación de esfuerzos .....                                 | 59        |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 41 Desplazamiento de la base del motor.....                       | 59  |
| Figura 42 Modelado del tablero sobre mesa.....                           | 60  |
| Figura 43 Pintado y secado en horno .....                                | 61  |
| Figura 44 Distribución física de I/O.....                                | 63  |
| Figura 45 Distribución física del controlador .....                      | 65  |
| Figura 46 Simulación Fuente DC 24 V.....                                 | 66  |
| Figura 47 Circuito de entrada análoga al 0%.....                         | 67  |
| Figura 48 Circuito de entrada análoga al 100%.....                       | 67  |
| Figura 49 Identificación de bobinas .....                                | 68  |
| Figura 50 Descripción de entradas y salidas del driver.....              | 70  |
| Figura 51 Fuente de voltaje DC .....                                     | 72  |
| Figura 52 Módulo de activación en bajo y alto (Emisor común).....        | 73  |
| Figura 53 Módulo de ampliación de I/O .....                              | 74  |
| Figura 54 Simulación módulo regulador a 5 VDC .....                      | 75  |
| Figura 55 Acondicionador RDP Datalogger .....                            | 78  |
| Figura 56 Celda de carga .....   | 79  |
| <i>Figura 57 LVDT RDP ACT2000C</i> .....                                 | 80  |
| <i>Figura 58 LVDT RDP ACT4000C</i> .....                                 | 81  |
| Figura 59 Maquina de ensayos universales (AMSLER FM-1033) .....          | 84  |
| Figura 60 Código se seteo para canal de entrada de datos .....           | 88  |
| Figura 61 Seteo de canales de entrada.....                               | 89  |
| Figura 62 Parámetros para comunicación serial en Matlab .....            | 90  |
| Figura 63 Interfaz HMI de comunicacion .....                             | 91  |
| Figura 64 Reseteo de configuracion .....                                 | 92  |
| Figura 65 Código para comunicación serial RS232 .....                    | 93  |
| Figura 66 Esquema de comunicación entre Matlab y PLC S7-1200.....        | 94  |
| Figura 67 Configuración de comunicación de bloque TRCV_C.....            | 96  |
| Figura 68 Nombres de datos del bloque TRCV_C_Data .....                  | 96  |
| Figura 69 Bloque de datos.....   | 97  |
| Figura 70 Definición del tipo de datos del bloque RECEIVED_Data.....     | 97  |
| Figura 71 Bloque de datos TRCV_C.....                                    | 98  |
| Figura 72 Configuración de comunicación de bloque TSEND_C .....          | 98  |
| Figura 73 Nombres de datos del bloque TSEND_C_Data.....                  | 99  |
| Figura 74 Definición del tipo de datos del bloque SEND_Data.....         | 99  |
| Figura 75 Configuración de Timer.....                                    | 99  |
| Figura 76 Bloque de datos TSEND_C .....                                  | 100 |
| Figura 77 Configuración de parámetros de comunicación.....               | 101 |
| Figura 78 Configuración del tipo de datos de entrada .....               | 101 |
| Figura 79 Ventana de inicio de sesion .....                              | 102 |
| Figura 80 Ventana de interfaz Humano-Maquina .....                       | 103 |
| Figura 81 Venta de mando por control manual.....                         | 104 |
| Figura 82 Venta de conexión PLC-Datalogger y visualizador de datos ..... | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 83 Ventana de configuracion de parámetros .....                    | 106 |
| Figura 84 Venta de graficas Fuerza VS Deformación.....                    | 106 |
| Figura 85 Ensayo de flexión en viga de pino (Unidades en milímetros) .... | 108 |
| Figura 86 Área transversal (Pino) .....                                   | 108 |
| Figura 87 Grafica de Fuerza Vs Deformación en viga de pino .....          | 110 |
| Figura 88 Grafica Esfuerzo Vs Deformación en viga de dos materiales ....  | 111 |
| Figura 89 Área transversal de viga de dos materiales .....                | 112 |
| Figura 90 Área transversal equivalente en acero.....                      | 113 |
| Figura 91 Grafica Fuerza Vs Deformación en viga de dos materiales .....   | 116 |
| Figura 92 Ensayo de flexión en viga de pino (Unidades en milímetros) .... | 117 |
| Figura 93 Área transversal (Pino) .....                                   | 118 |
| Figura 94 Grafica de Fuerzo Vs Deformación en viga de laurel .....        | 119 |
| Figura 95 Ensayo de flexión en viga de Bambú (Unidades en milímetros)     | 121 |
| Figura 96 Área transversal (Bambú) .....                                  | 121 |
| Figura 97 Grafica de Fuerzo Vs Deformación en viga de laurel .....        | 123 |

## **RESUMEN**

El presente trabajo de titulación describe el proceso de modernización del Vibróforo de baja frecuencia del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de la Fuerzas Armadas- ESPE. Muestra el estado inicial del equipo y detalla la evolución que tuvo para llegar a ser una maquina moderna que presta las mismas características que tiene los equipos actuales. La modernización comprende un control mediante un PLC S7-1200 para el manejo del Vibróforo que se comunica a través del protocolo TCP/IP con el software HMI, y este a su vez con el datalogger RDP que acondiciona y amplifica las señales de los sensores de desplazamiento línea (LVDT) y la celda de carga. Cabe mencionar que la comunicación utilizada entre el datalogger y el HMI es mediante comunicación serial. Los datos obtenidos en la HMI son procesados para luego ser graficados y analizados en base a la práctica de flexión de vigas. Esta mejora en el equipo tiene el objetivo de elevar la calidad de las prácticas realizadas y brindar al estudiante una mayor comprensión del fenómeno de flexión de vigas.

### **PALABRAS CLAVES:**

**MODERNIZACIÓN**

**VIBRÓFORO**

**FLEXIÓN DE VIGAS**

**DATALOGGER**

**CELDA DE CARGA,**

**COMUNICACIÓN TCP/IP**

**COMUNICACIÓN SERIAL.**



## **ABSTRACT**

The present work describes the process of modernization of the Vibrophor of the Materials Mechanics Laboratory at University of the Armed Forces - ESPE. It shows the initial state of the equipment and details the evolution it had to become a modern machine that provides the same characteristics just like a current equipment. The modernization comprises a control by means of a S7-1200 PLC for the management of the Vibrophor that is communicated through the TCP / IP protocol with the HMI software, and this in turn with the RDP datalogger that conditions and amplifies the signals of the sensors of Displacement line (LVDT) and load cell. It should be mentioned that the communication used between the datalogger and the HMI is through serial communication. The data obtained in the HMI are processed and then plotted and analyzed based on beam bending practice. This improvement in the equipment has the objective to raise the quality of the practices carried out and give the student a greater understanding of the phenomenon of bending of beams.

### **KEY WORDS:**

**MODERNIZATION**

**VIBROPHOR**

**BENDING OF BEAMS**

**PLC**

**DATALOGGER**

**LVDT, LOAD CELL T**

**CP / IP COMMUNICATION**

**SERIAL COMMUNICATION.**

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En este trabajo de titulación se detallará el proceso de modernización del Vibróforo de baja frecuencia del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, para que cumpla todas las prestaciones y facilidades que lo haría una estación actual y además brinde al estudiante un fácil manejo y manipulación al realizar el estudio practico sobre análisis de flexión de vigas.

### **1.2. ANTECEDENTES**

El laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE en su continuo afán de proporcionar el mayor soporte práctico a los alumnos del departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica se encuentra interesado en poner a punto sus instalaciones y equipos, por esta razón el desarrollo del proyecto está orientado a los estudiantes con el fin de aplicar los conocimientos teóricos y mejorar su desarrollo profesional mediante una práctica experimental con la ayuda de maquinaria técnica que proporcione fácilmente datos que ayudarán a describir de mejor manera el estudio de la flexión en vigas.

### **1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El vibróforo de baja frecuencia es una maquina adecuada para realizar pruebas de fatiga, así como también aplicar cargas para determinar la resistencia de los materiales para los diferentes tipos de ensayos que se pueden realizar. Estas máquinas son ocupadas ampliamente en pruebas de

materiales de industrias metalúrgicas y universidades o centros de educación superior.

La máquina utilizada actualmente en el laboratorio de Mecánica de Materiales no cumple con los requerimientos para la realización de la práctica como son la estabilidad de la carga aplicada, la visualización correcta de los datos y el fácil manejo del equipo. El objetivo del proyecto es sustituir los elementos de accionamiento manual por elementos electromecánicos gobernado por un controlador lógico programable (PLC) con el fin de facilitar el manejo y manipulación del equipo, y además de corregir todos los desperfectos mecánicos que la máquina posee. Posterior a esto se realizará el análisis y comportamiento mecánico de la pieza a estudiar (viga) con la ayuda de un sistema de instrumentación actualizado para disminuir distorsiones en la obtención de datos.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. General**

Modernizar el vibróforo de baja frecuencia marca Amsler e implementar la práctica de flexión de vigas para el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

### **1.4.2. Específicos**

- Modernizar el vibróforo de baja frecuencia marca Amsler para mejorar su funcionalidad y el manejo del mismo.
- Diseñar los circuitos eléctricos y electrónicos necesarios para la adquisición de datos para la realización de la práctica de flexión de vigas.

- Implementar las reglas lógicas de programación para el sistema de control de tal manera que mejore la precisión de los resultados y facilite la realización de la práctica.
- Implementar una interfaz humano-maquina (HMI) que permita visualizar la información adquirida en la práctica.

### **1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO**

La automatización es una serie de métodos y técnicas ayudados por un conjunto de reglas capaces de enviar y recibir información del proceso sobre el cual actúan, además facilita la realización de tareas tales como: revisar la información, procesarla y tomar decisiones que cumplan con el objetivo para mejorar el resultado final del proceso. Dependiendo de la complejidad del proyecto, la automatización puede ser realizada mediante subsistemas donde su aplicación pueda darse mediante procesos manuales o semiautomáticos. Hoy en día con tecnología actualizada se hace cada vez más indispensable ya que muchas veces los repuestos o reparaciones de algunas de estas máquinas pueden ser costosas debido a que están descontinuadas y las casas fabricantes ya no elaboran repuestos.

Este trabajo de titulación está enfocado en fomentar una práctica más activa y participativa, donde el estudiante impulse el método científico y el pensamiento crítico utilizando equipos fiables que ayude a obtener un conocimiento válido, de este modo el alumno se beneficia desarrollando destrezas y habilidades en el manejo de instrumentos y equipos. La realización de trabajos prácticos motiva y entusiasma al alumno, aumentando la comprensión respecto de los conceptos y procedimientos científicos.

En base a los aportes y beneficios que prestará la realización de este proyecto los autores realizan la propuesta de hacer la automatización del vibróforo de baja frecuencia que se encuentra parcialmente inhabilitada por no cumplir con los requerimientos de la práctica de laboratorio, además el

modelo de esta máquina se encuentra discontinuado por lo que sus elementos no se los encuentra fácilmente en el mercado y dificulta la reparación y mantenimiento que se puede aplicar a esta. La máquina anteriormente mencionada ha cumplido alrededor de 50 años de servicio en la universidad por lo que se recomienda realizar una pertinente actualización de los elementos y dispositivos que la conforman. Examinando los diferentes equipos existentes en el mercado internacional encontramos que una máquina con las mismas prestaciones (carga máxima aplicable) puede llegar a costar entre los veinte mil a veinticinco mil dólares americanos (Zwick, 2016) mientras que la automatización del vibróforo del laboratorio tendría un costo de aproximado de mil seiscientos dólares americanos con lo que se convierte en la mejor opción considerando la relación costo beneficio.

Esta máquina es indispensable para el desarrollo académico del estudiante puesto que el tema de estudio de la práctica es fundamental en los conocimientos que debe poseer un ingeniero Mecánico, Mecatrónico y Civil, cooperando de esta manera con las tres carreras mencionadas, por lo que el laboratorio no puede prescindir de la misma. Este proyecto contribuiría a la tarea de la universidad a ser líder en la innovación académica y tecnológica, al estar siempre en constante mantenimiento y renovación de sus equipos de laboratorio de acuerdo con la tecnología utilizada a nivel internacional. Cabe mencionar que este tipo de equipos no poseen gran parte de las universidades del país, debido a que el estudio de este fenómeno físico-mecánico lo hacen de forma parcial, es decir no cuentan con todas las prestaciones (análisis de: graficas, desplazamientos, fuerzas, momentos).

## **1.6. ALCANCE DEL PROYECTO**

### **1.6.1. Componentes Mecánicos**

Debido a que el presente proyecto tiene como objetivo la “Modernización del vibróforo de baja frecuencia e implementación de la práctica de flexión de

vigas”, se lo ha dividido en dos partes tales como; sistema de fuerza y sistema de control.

Se realizará el diseño mecánico de un acople que unirá el eje de una válvula y el eje de un motor a pasos. Este conjunto hará que la potencia del motor hidráulico aumente o disminuya y regule la presión suministrada al sistema. El acople será construido en base a un mecanizado con las especificaciones mecánicas requeridas.

Además, las partes y componentes tanto mecánicos, eléctricos y electrónicos de medición estarán acoplados técnicamente a la estructura de manera que no influyan en la práctica a realizar. Los elementos de control serán ubicados en el tablero principal y controlarán la activación de los sensores actuadores.

A continuación, se lista algunos de los elementos y sistemas mecánicos que serán empleados para la implementación:

- Acople eje-motor
- Acoples mecánicos para la estructura (Pernos, tuercas).
- Electroválvulas hidráulicas reguladoras de flujo.
- Soporte para sensores LVDT'S.
- Panel de mando

Para las partes que conforman tanto el sistema de acople como los soportes de sensores está planificado se haga uso de procesos de fabricación como: corte, taladrado, fresado, torneado, pulido, doblado y troquelado, las cuales permitirán la construcción mecánica de los elementos antes mencionado.

### **1.6.2. Componentes Electrónicos/Eléctricos**

Para seleccionar los componentes electrónicos se tienen pensado dividir al proyecto en dos fases. La primera constará de la adquisición de datos emitidos por los sensores, estos datos serán receptados por un datalogger para ser amplificados, acondicionados y enviados a la PC para posteriormente ser procesados en un software diseñado bajo la plataforma de Matlab. La segunda fase constará de elementos eléctricos y electrónicos que constituirán el sistema de control.

Algunos de los elementos utilizados en el diseño eléctrico y electrónico se indican a continuación:

- Controlador lógico programable (PLC: SIEMENS S7 1200).
- Módulo de salidas digitales para PLC.
- Fuente DC de 24 [V].
- Sensores de posición (LVDT).
- Datalogger RDP ELECTRONICS MDO 603.
- Contactores y relés.
- Elementos de conexión y de seguridad (cable de cobre, fusibles, disyuntores).

Cabe mencionar que gran parte de los elementos eléctricos y electrónicos antes detallados no serán presupuestados para el desarrollo de proyecto debido que se encuentran a disposición en el laboratorio.

### **1.6.3. Componentes del Sistema de Control**

La etapa de control que permita el correcto funcionamiento del equipo será gobernado por un Controlador Lógico Programable (PLC SIEMENS S7 1200) que es un dispositivo de control independiente, además proporciona flexibilidad en las opciones de programación especialmente el "lenguaje de contactos", con un número de E/S mayor a un microcontrolador pudiéndose

así aumentar los módulos según sea necesario, este componente recogerá los datos a través de las entradas digitales y analógicas, para tomar decisiones en base a criterios pre programados.

Adicionalmente para el manejo de las señales emitidas por los sensores LVDT, que son de naturaleza analógica se hace necesario el uso de una tarjeta de adquisición (DATA LOGGER RDP ELECTRONICS MDO 603) de datos para posterior a eso procesarlos.

#### **1.6.4. Software para Implementación, Análisis y Simulación**

Los programas o software a utilizar en el desarrollo del proyecto serán:

- MATLAB: Diseño del interfaz humano maquina (HMI)
- INVERTOR AUTODESK: para el modelado del sistema.
- TIA PORTAL: facilita la programación de todas las reglas lógicas para el funcionamiento del equipo, además que ayuda con la comunicación entre PLC-CPU-HMI.
- CADe SIMU: ayuda con la simulación de circuitos eléctricos, tanto para circuitos de control como de potencia



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. FLEXIÓN EN VIGAS

##### 2.1.1. Vigas

Una viga es una barra rígida utilizada para soportar cargas perpendiculares sobre la misma. Actualmente la utilización de vigas es indispensable al momento de desarrollar ingeniería, estas pueden estar en diferentes condiciones según sea el caso de aplicación.

##### 2.1.1.1. Vigas isostáticas:

Son vigas en las cuales las reacciones que provocan los apoyos donde reposa la viga son calculadas fácilmente con la ayuda de ecuaciones estáticas básicas:

$$\sum \vec{F}_x = 0$$

$$\sum \vec{F}_y = 0$$

$$\sum \vec{M} = 0$$

Las vigas isostáticas pueden estar dispuestas de la siguiente manera:

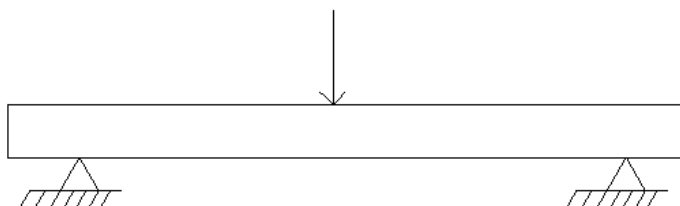


Figura 1 Viga simplemente apoyada



Figura 2 Viga en voladizo

### 2.1.1.2. Vigas hiperestáticas

Son aquellas en la que los apoyos a los que están sometidas las vigas provocan más reacciones dependiendo del tipo de carga que se le aplique, mismas que resultan imposibles de resolver con las ecuaciones estáticas básicas anteriormente mencionadas.

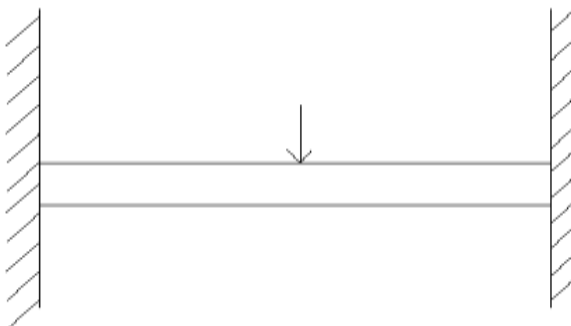


Figura 3 Viga empotrada

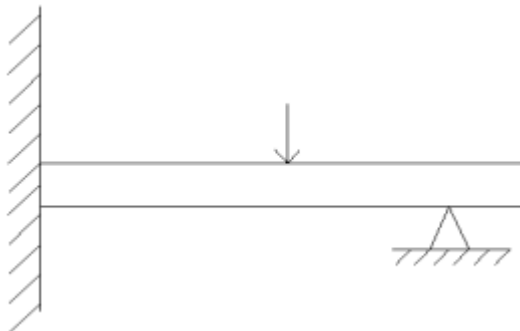


Figura 4 Viga empotrada y apoyada

### 2.1.2. Deflexión en viga simplemente apoyada

Al aplicar una carga puntual sobre una viga esta provoca una curva elástica que tiene relación con la fuerza, la longitud libre entre apoyos, el módulo de elasticidad o módulo de Young, y el momento de inercia de la sección transversal.

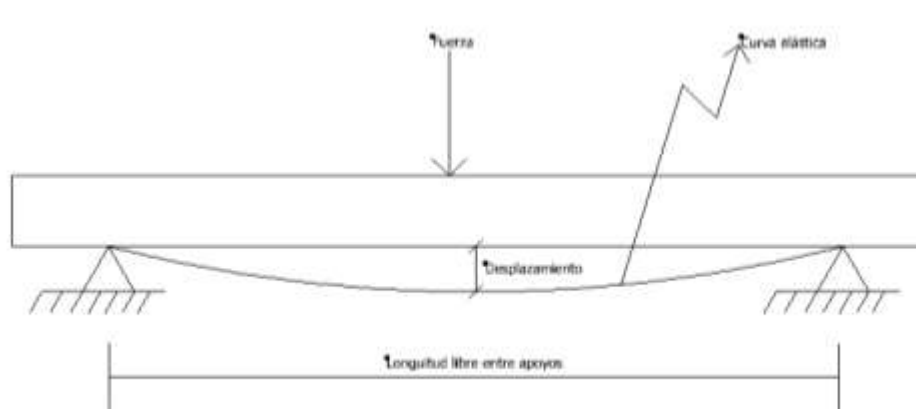


Figura 5 Viga simplemente apoya con carga puntual

Todos estos factores están relacionados en la siguiente ecuación para determinar el desplazamiento con aplicación de una carga puntual en el centro de la viga.

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Donde:

$\delta$ : Desplazamiento

$P$ : Valor de la carga aplicada

$L$ : Longitud entre apoyos

$E$ : Módulo de elasticidad

$I$ : Momento de inercia

### 2.1.3. Vigas de dos materiales

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Esta fórmula está dada para vigas de un solo material a la cual se le aplica una carga puntual en el centro de la misma. Sin embargo, para utilizar esta fórmula para vigas de dos materiales se debe hacer un análisis diferente que se detalla a continuación.

Para aplicar la fórmula anterior se debe obtener un módulo de elasticidad equivalente a los dos materiales al igual que el momento de inercia de la sección.

Observamos que la viga está compuesta de 4 varillas de acero incrustadas en hormigón que está distribuida de la siguiente manera:

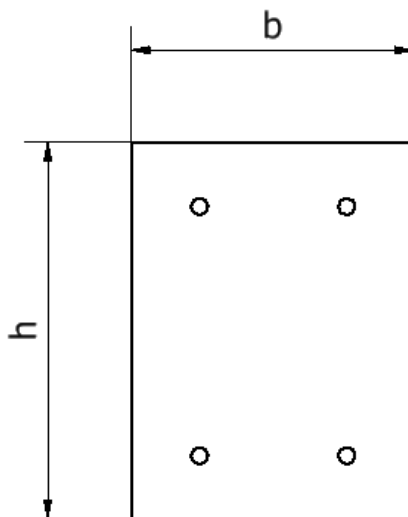


Figura 6 Sección transversal de una viga de dos materiales

La carga aplicada hace que las fibras superiores se compriman y las inferiores se alarguen.

Las varillas ubicadas en la parte superior de la línea neutra LN son de gran esbeltez de tal manera que el esfuerzo crítico es insignificante, en conclusión la sección de las varillas superiores se desecha. al igual que en la parte inferior de la línea neutra LN, el hormigón se encuentra a tracción y al ser este un material frágil que tiene una excelente resistencia a la compresión y poca resistencia a la tracción se desecha la sección inferior (Pérez, 2013), quedando la sección transversal de la siguiente manera:

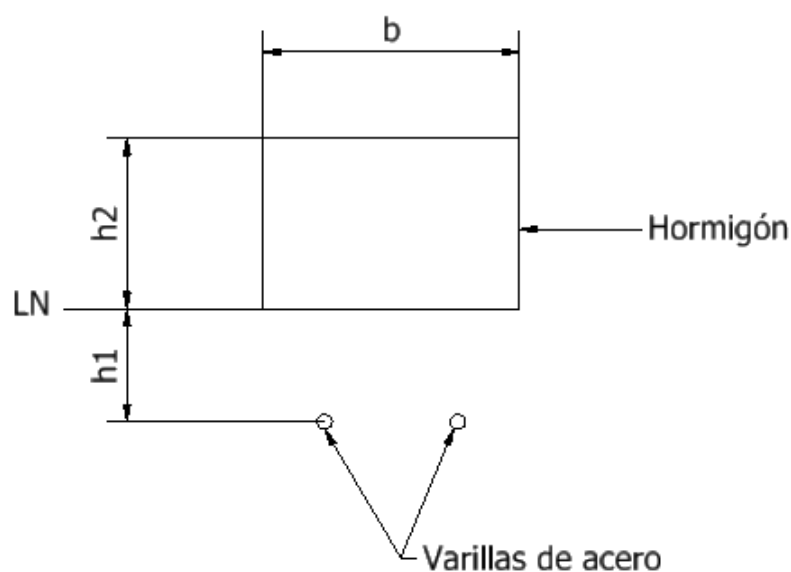


Figura 7 Fibras superiores a compresión e inferiores a tracción.

A partir de esto obtenemos un equivalente que relacione el módulo de elasticidad del acero con el hormigón de la siguiente manera:

$$n = \frac{E_{Acero}}{E_{Hormigon}}$$

El ancho de la sección del hormigón se divide para el valor antes calculado:

$$b_1 = \frac{b}{n}$$

Obteniendo la sección transversal equivalente en acero para trabajar con este con único material.

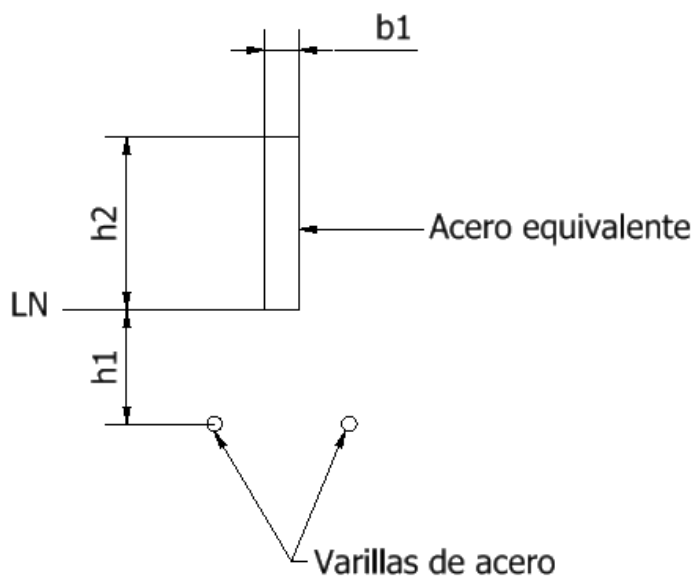


Figura 8 Sección transversal equivalente  
Fuente: (Pérez, 2013)

Para obtener los valores de las alturas  $h_1$  y  $h_2$ , igualamos los momentos estáticos de primer orden, de la parte superior e inferior de la línea neutra LN.

$$Q_{sup} = Q_{inf}$$

$$(A' \cdot Y')_{sup} = (A' \cdot Y')_{inf}$$

Donde:

$A'$ : Sección transversal

$Y'$ : Distancia desde el centro de gravedad del área transversal a la línea neutra LN

## 2.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD O MÓDULO DE YOUNG

El módulo de Young es un factor propio de una característica mecánica de los materiales, este valor resulta ser el mismo cuando se trata de ensayos a

tracción como a compresión esto quiere decir que es un valor independiente del esfuerzo siempre y cuando no exceda el límite elástico.

El módulo de elasticidad es distinto para todos los tipos de materiales mientras más frágil sea el material más bajo es su módulo de elasticidad.

### **2.2.1. Ley de Hooke**

El módulo de Young puede ser calculado experimentalmente con la ayuda de La Ley de Hooke que establece que la deformación unitaria es directamente proporcional al valor de la carga aplicada.

$$E = \frac{P}{\delta}$$

Donde:

$E$ : Módulo de Young

$P$ : Valor de la carga aplicada

$\delta$ : Desplazamiento

### **2.3. MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL**

El momento de inercia es una propiedad geométrica del área transversal de una viga estructural, este momento depende de la forma de la sección del material, es decir de la distribución de la masa con respecto a un eje de rotación, mientras más alejada este la distribución de la masa más elevado es el momento de inercia.

Antes de calcular el momento de inercia es importante encontrar el Centroides que no es más que el centro geométrico de la sección transversal, dependiendo de la uniformidad de la sección se ve si es necesario realizar divisiones del área.

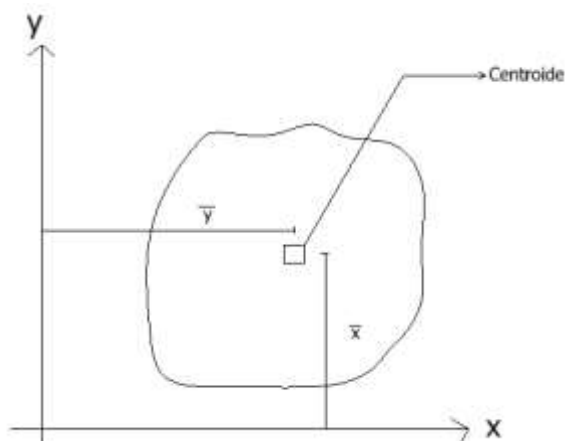


Figura 9 Centroide

## 2.4. MOMENTO FLECTOR

También conocido como momento flexor, definido como la suma de todos momentos producidos por las cargas externas (fuerzas cortantes) en un punto determinado de la sección transversal de la viga.

Los signos del momento flexor dependen del efecto del mismo es decir cuando el momento produce tensión en las fibras inferiores de la línea neutra se trata de un momento positivo (tensión), mientras que en la parte superior tenemos un momento negativo (compresión).

## 2.5. ANÁLISIS DE GRAFICA FLEXIÓN DE VIGAS

Este tipo de ensayo consiste en aplicar una carga sobre una viga que se encuentra situada sobre apoyos para medir la deformación provocada por la fuerza ejercida sobre esta.

El ensayo de flexión de vigas tiene como propósito principal determinar la curva de deformación con respecto al desplazamiento, para verificar cual es la carga máxima que puede soportar un material.



### 2.5.1. Gráfica

Esta grafica es sometida a análisis para verificar puntos e intervalos críticos del material tales como: zona elástica, zona plástica, punto de fluencia y tensión máxima

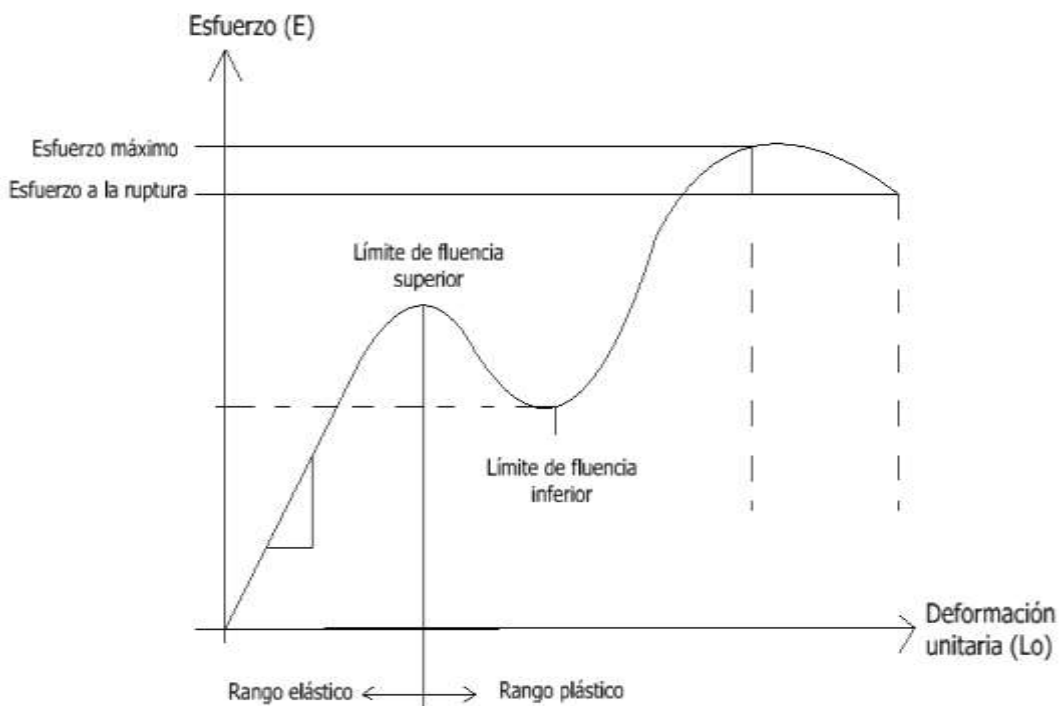


Figura 10 Esfuerzo Vs Deformación

La pendiente de la curva perteneciente a la zona elástica da como resultado en módulo de elasticidad o módulo de Young, así como también se puede analizar que en la zona elástica el material ya no puede regresar a su forma original perdiendo así su propiedad de resiliencia.

## 2.6. AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA

Con el pasar de los años el hombre siempre se ha visto en una constante búsqueda para hallar la manera de realizar sus trabajos de forma más sencilla con resultados eficientes, siempre tratando de mejorar los procesos industriales lo que implica reducir al máximo los defectos que se presenten

durante la producción y además garantizando la seguridad de todo el personal que está involucrado.

Hoy en día es posible lograr dicho objetivo gracias a las prestaciones que brinda la tecnología y a la evolución de los sistemas eléctricos, electrónicos, informáticos y mecánicos, utilizados en todo tipo de aplicación.

La automatización se define como el conjunto de métodos y procedimientos utilizados para la sustitución de tareas normalmente realizadas por seres humanos a sistemas vinculados con la tecnología para mejorar su productividad industrial.

### **2.6.1. Objetivos de la automatización**

Sin duda alguna la automatización es un método adoptado por la industria para:

- Aumentar la producción de la empresa reduciendo los costos de producción sin descuidar la calidad de la misma.
- Ejecutar tareas que humanamente no son posibles de realizar.
- Optimizar las condiciones de trabajo del operador reduciendo al máximo el riesgo de accidentes durante la tarea a realizar.
- Mejorar la disponibilidad de los productos, pudiendo proveer las cantidades necesarias en el momento preciso.
- Facilitar las tareas de mantenimiento de manera que el operador no requiera de información detallada o gran conocimiento para la manipulación y realización del proceso.
- Integrar la gestión y producción.

## **2.6.2. Instrumentación mecatrónica**

### **2.6.2.1. Medición de desplazamiento lineal**

Los sensores o transductores de desplazamiento lineal, son utilizados para medir el movimiento de un cuerpo a lo largo de una trayectoria rectilínea en diferentes rangos, obteniendo como resultado de una relación entre la magnitud física (presión, fuerza, aceleración, o temperatura) y la magnitud eléctrica (resistencia).

Los rangos de trabajo de estos medidores de desplazamiento son muy amplios de acuerdo a la necesidad presentada, su rango de trabajo es desde las micras hasta los 200m.

Según sea su principio de funcionamiento pueden ser con o sin contacto con la referencia a cuya posición se desee medir, pero siempre tomando en cuenta que es necesario un circuito de acondicionamiento de señal específico.

Los sensores utilizados para medir desplazamiento pueden ser de distintos tipos:

### **2.6.2.2. Sensores resistivos (Potenciómetros)**

Están conformados por un elemento resistivo y un contacto móvil, el voltaje de salida se obtiene midiendo en el punto de contacto móvil con respecto a uno de sus extremos como se indica en la figura 4. El cuerpo que va a emitir las variaciones de movimiento se conecta al contacto móvil. El desplazamiento generado se obtiene a partir de la relación lineal entre el voltaje de salida y las variaciones de los desplazamientos observados.

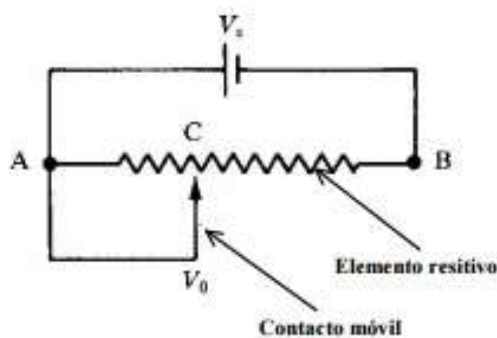


Figura 11 Esquema eléctrico del sensor resistivo  
Fuente: (González, 2016)

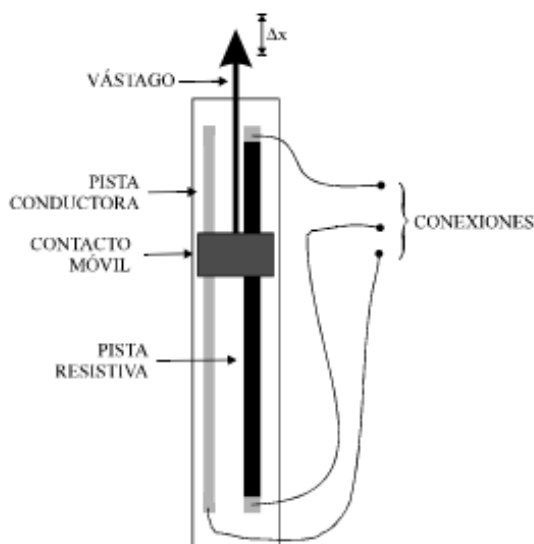


Figura 12 Esquema físico de un sensor resistivo  
Fuente: (García, 2016)

### 2.6.2.3. Sensores inductivos

Los desplazamientos que se van a medir con este tipo de sensores se obtienen mediante una variación de inductancia, que generalmente se producen a través de variaciones en el circuito magnético de una bobina.

### 2.6.2.3.1. LVDT

Transformador diferencial de variación lineal (LVDT). Es uno de los sensores inductivos más importantes, debido a su casi infinita resolución, poco rozamiento y alta repetibilidad.

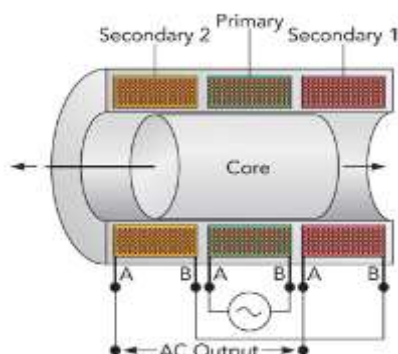


Figura 13 Estructura interna de un LVDT  
Fuente: (Tito, 2011)

Su principio de funcionamiento está basado en el uso de un núcleo de material ferromagnético unido al eje del cuerpo cuyo movimiento se quiere medir. El núcleo se desplaza linealmente entre un devanado primario y dos secundarios que producen un movimiento mismo que hace que varíe la inductancia entre los devanados, ver figura 6.

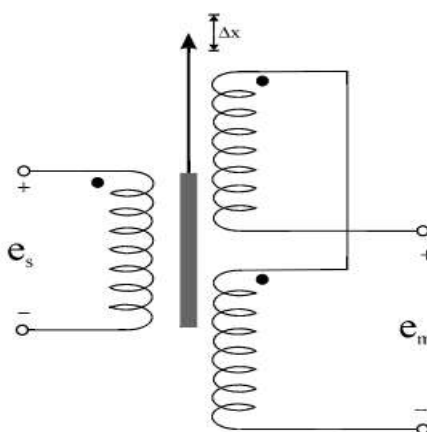


Figura 14 Esquema de funcionamiento de un de un LVDT  
Fuente: (García, 2016)

Además de las ventajas señaladas, el LVDT presenta:

- Alta linealidad

- Vida mecánica infinita
- Gran sensibilidad
- Respuesta dinámica elevada

#### 2.6.2.4. Celda de carga

Las celdas de carga son los transductores más utilizados en basculadas electrónicas, debido a que tiene por finalidad transformar la fuerza aplicada en una señal electrónica (voltaje), dependiendo la naturaleza de la celda esta puede emitir señales analógicas o digitales, en el caso de ser análogas se necesita estrictamente un circuito acondicionador de señal.

Las celdas de carga dependen de un material (metal) que es expuesto a una variación aplicada por una fuerza. El material con el cual está construido se diseña de acuerdo con la capacidad máxima de carga que se desea aplicar ya sea a tensión, compresión o ambos a la vez. Junto al metal se colocan galgas extensiométricas cuya función es variar su resistencia conforme el metal se flexiona, dichas galgas son colocadas en un arreglo de puente de Wheatstone como se indica en la figura 8, que proveen una señal de voltaje proporcional a la fuerza aplicada al inducir un voltaje que alimente dicho circuito.

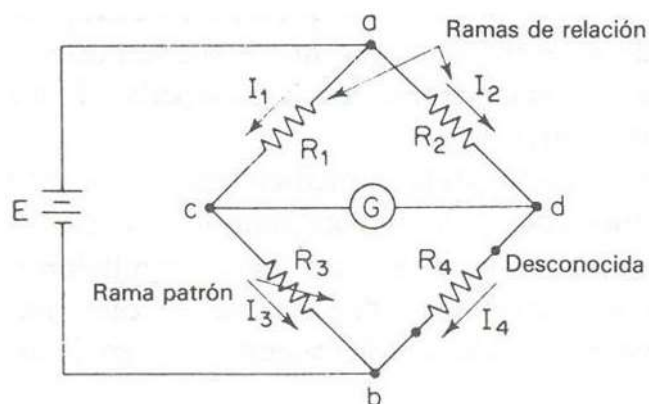


Figura 15 Puente de Wheatstone  
Fuente: (COOPER & HELFRICK, 1991)

Donde:

- **E**, Fuente de alimentación del circuito
  - **R1**
  - **R2**
  - **R3**
- } son resistencias variables de valor conocido
- **R4**, es la resistencia de valor desconocido
  - **G**, multímetro

#### 2.6.2.4.1. Celdas de carga con un solo punto

Este tipo de celdas son utilizadas muy a menudo para bajas escalas, la capacidad de medición de estas celdas varía entre 100 gramos a 50 kilogramos.

#### 2.6.2.4.2. Celdas de carga tipo S

Llamado así por su forma geométrica, este tipo celdas son utilizadas para medir tanto a compresión como a tensión. Además, su rango de trabajo es muy amplio, permitiendo medir magnitudes hasta las toneladas.



Figura 16 Celda de carga tipo S  
Fuente: (SIEMENS, 2016)

## **2.7. PROGRAMACIÓN DE CONTROLADORES AUTÓMATAS**

### **2.7.1. Controladores**

Antes de la automatización industrial la maquinaria era gobernada de forma manual. Este tipo de control era el más sencillo y generalmente usado para la puesta en marcha y parada del motor. En la actualidad existe una gran cantidad de controladores de tipo manual, neumáticos o eléctricos para los diferentes tipos de aplicaciones o usos que se les pueda dar.

Los controladores electrónicos mayormente usados son los Controladores Lógico Programables (PLC), las PC con tarjetas de adquisición de datos y los microcontroladores.

Un controlador puede definirse como un instrumento que toma una señal desde un sensor y la compara con un valor establecido (setpoint), para luego ajustar la salida según las instrucciones o algoritmos que han sido almacenados en el mismo.

#### **2.7.1.1. Controlador Lógico Programable (PLC)**

Los PLC nacieron de la necesidad de remplazar a los circuitos de control con lógica de relays. Estos equipos tienen memorias programables y regrabables que vía software se graban las instrucciones que permitan seguir la lógica de control haciendo cambiar los estados de sus salidas a ON/OFF.

El PLC normalmente está constituido por una fuente de alimentación, una unidad central de procesamiento (CPU), módulos de entrada y salida (E/S), módulos de memoria y unidades o terminales programación.



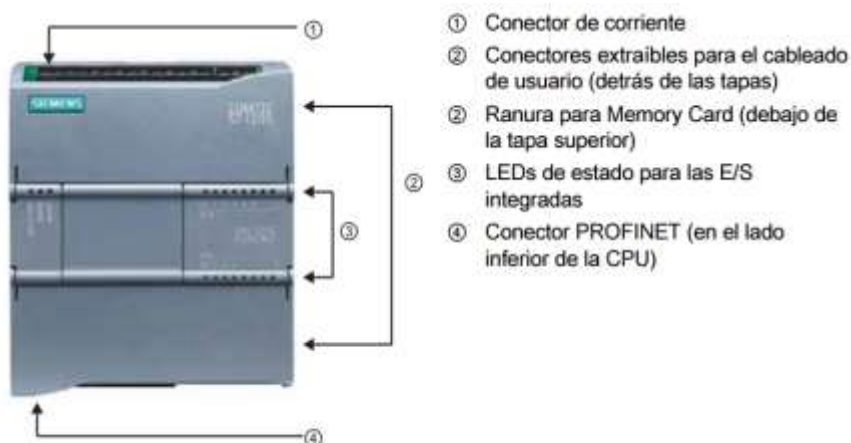


Figura 17 PLC Siemens S7-1200

Fuente: (SIEMENS, 2016)

### 2.7.1.2. Microcontroladores

Un microcontrolador es un chip o circuito integrado que en cuyo interior posee una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida (E/S) y diversos módulos para el control de periféricos (Puertos serie y paralelo, temporizadores, Conversores Digital/Análogo, conversores Análogo/Digital, etc.)

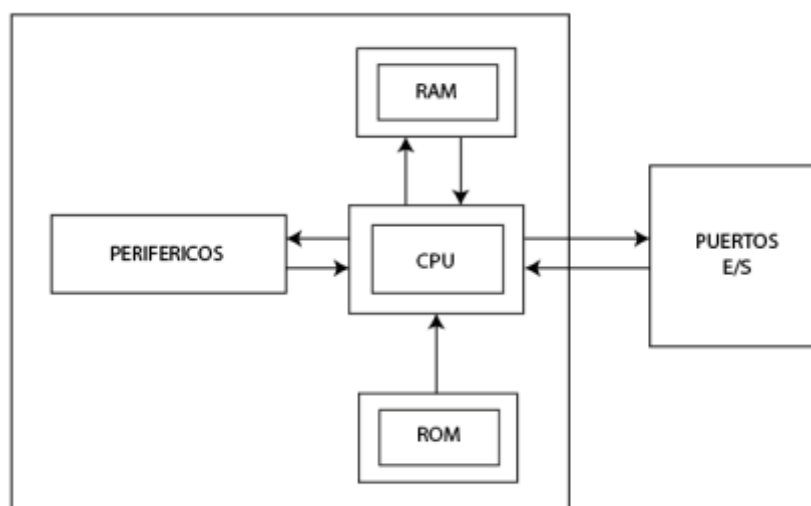


Figura 18 Esquema de la estructura de un microcontrolador

Una de las características de los microcontroladores es su bajo consumo de potencia (entre los mW) lo que los hace adecuados para aplicaciones que usen baterías.

Todos los microcontroladores requieren de una programación que se almacena en la memoria ROM, el microcontrolador las lee y ejecuta las instrucciones para que realice las funciones deseadas por el programador.

## **2.8. SISTEMAS HIDRÁULICOS**

Es un sistema que trabaja mediante la acción de una resistencia o el empuje de una presión para que un líquido fluya a través de un área reducida. El líquido que será suministrado puede ser de diferente naturaleza de acuerdo a la presión que se desee transmitir, entre ellos pueden ser: agua, aceites y sustancias no oxidantes, mismo que facilitan el movimiento de las piezas a las cuales están aplicadas.

Este tipo de sistema tiene un amplio campo de aplicación entre los más destacados se pueden mencionar: prensa hidráulica, elevadores hidráulicos, gato hidráulico y el sistema de accionamiento de frenos.

Los sistemas hidráulicos constan principalmente de cuatro elementos (ver Figura 3):

- Tanque de almacenamiento del fluido a suministrar al sistema.
- Bomba hidráulica que se encarga de forzar el suministro del fluido a través del circuito.
- Válvulas para controlar la presión y la dirección del fluido.
- Actuadores que se encargan de transformar la energía hidráulica en energía mecánica.

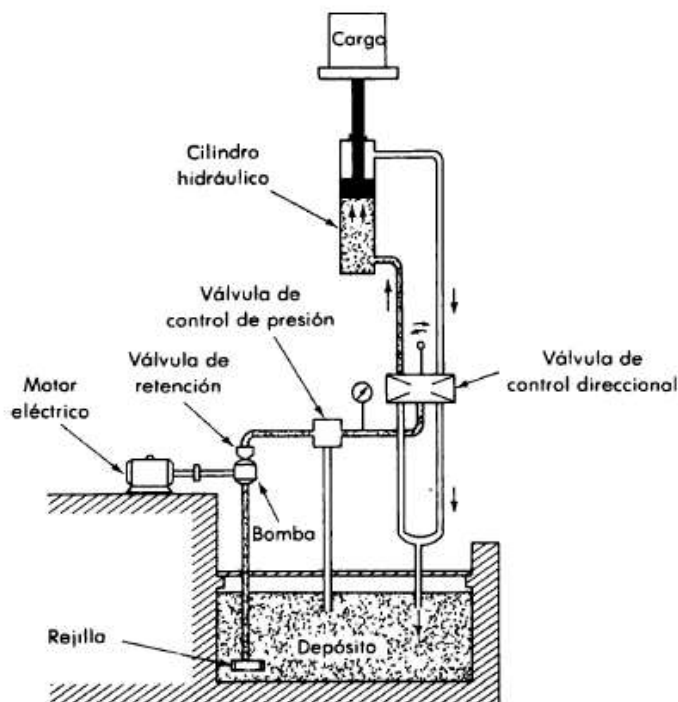


Figura 19 Circuito Hidráulico  
Fuente: (Ogata, 1987)

## 2.9. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

### 2.9.1. PC con tarjetas de adquisición de datos

Un sistema de adquisición de datos se puede articular utilizando un ordenador personal, un hardware de adquisición de datos y sensores. Este tipo de sistemas aprovechan la potencia de procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en las industrias, lo que se traduce a una solución potente, flexible y rentable (National Instruments, 2016).



Figura 20 Partes de un sistema DAQ

Fuente: (National Instruments, 2016)

Cabe mencionar que algunos sensores pueden necesitar de circuitos y componentes adicionales que permitan a la tarjeta de adquisición de datos poder leer la señal con precisión. Además, la PC debe contar con un software programable que controle la tarjeta DAQ y ayude a visualizar y almacenar los datos generados.

## 2.9.2. Señales

### 2.9.2.1. Tipos de señales

Una señal eléctrica se define como una variación causada por un fenómeno electromagnético, que sirve de información útil para un circuito eléctrico. Estas señales pueden ser de dos tipos: las señales analógicas y las señales digitales.

#### 2.9.2.1.1. Señales analógicas

Las señales analógicas son aquellas que varían continuamente en el tiempo, en cuanto a voltaje o corriente. Dentro de los parámetros más importantes en una señal analógica se encuentran el periodo y la frecuencia.

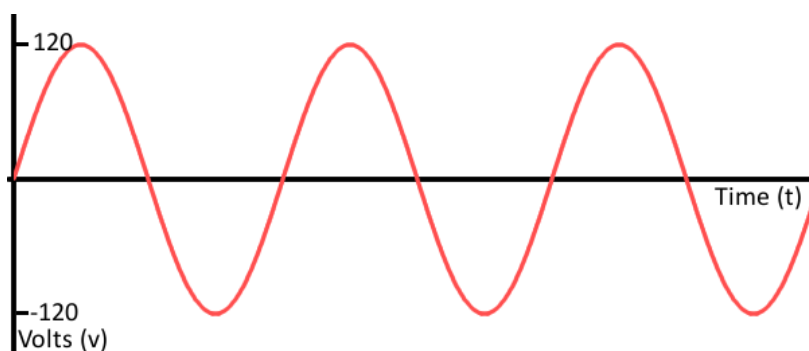


Figura 21 Señal Analógica de Voltaje  
Fuente: (SparkFun Electronics, 2016)

### 2.9.2.1.2. Señales digitales

Las señales digitales son aquellas que presentan una variación discontinua con respecto al tiempo y solo puede tomar ciertos valores discretos. Estos valores o niveles son llamados nivel alto (1 o verdadero) y nivel bajo (0 o falso). Los parámetros más importantes en una señal digital son la altura de pulso (nivel), ancho de pulso (duración) y la frecuencia (velocidad de pulsos por segundo).

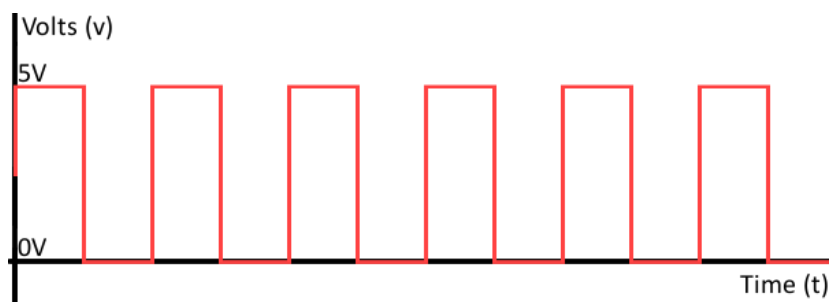


Figura 22 Señal Digital de Voltaje  
Fuente: (SparkFun Electronics, 2016)

### 2.9.2.2. Acondicionamiento de señales

#### 2.9.2.2.1. Adquisición y procesamiento de señales

La adquisición y procesamiento de señales consiste en un conjunto de métodos y técnicas de tratamiento de señales (filtrado, amplificación, etc.) que permitan obtener un conjunto de datos obtenidos a través de transductores, para que luego puedan ser procesados y analizados por un ordenador.

### 2.9.2.2.2. Datalogger

Un Datalogger (Registrador de Datos en español) es un equipo electrónico destinado a recoger y registrar datos en tiempo real a través de diferentes sensores que se conectan a este equipo. Es parte fundamental en un sistema de adquisición de datos. Dependiendo el modelo y prestaciones del equipo este puede registrar señales de tipo analógica (voltaje, corriente, etc.) o digital (frecuencia, ancho de pulso, etc.). Normalmente están asociados a una computadora para poder guardar y analizar los datos registrados.



Figura 23 Datalogger RDP Modular 600

Fuente: (RDP Group, 2016)

### 2.9.3. Software

#### 2.9.3.1. Matlab

Matlab es herramienta computacional matemática con un entorno de desarrollo integrado (IDE) y un lenguaje de programación de alto nivel propio conocido como lenguaje M.

El conjunto de funciones y herramientas que presta este software son:

- Operaciones con matrices
- Creación de funciones y representación graficas de las mismas

- Análisis numérico
- Creación de interfaces gráficas (GUI)
- Comunicación con otros dispositivos
- Simulación de sistemas dinámicos, etc.

### **2.9.3.2. HMI**

Una HMI (Interface Humano Maquina) es un programa informático que se comunica con el usuario mediante un ambiente visual, simple y de fácil manipulación. Es un conjunto interactivo que incluye elementos de control necesarios para la manipulación de un proceso y además brinda información de los datos obtenidos. Las principales funciones que brinda una HMI son:

- Monitoreo y supervisión
- Alarmas y eventos
- Control
- Generación de históricos

## **2.10. COMPONENTES DE LA MAQUINA**

### **2.10.1. Vibróforo**

El vibróforo de baja frecuencia es una máquina diseñada para estudiar el análisis de resistencia mecánica de diferentes materiales mediante la aplicación de una carga puntual sobre la viga de estudio, esta máquina a su vez puede realizar diferentes tipos de ensayos según sea necesario mediante cargas dinámicas como también mediante cargas estáticas.



Figura 24 Vibróforo de baja frecuencia

### 2.10.2. Marco de carga

También denominado pórtico de carga, definida como una estructura construida de tal forma que pueda resistir todo tipo de reacción que se produce al aplicar progresivamente la carga del actuador sobre el material de estudio, esta estructura tiene la capacidad de soportar ensayos mecánicos mediante la acción de cargas dinámicas y estáticas.





Figura 25 Pórtico de carga del Vibróforo de baja frecuencia

### **2.10.3. Actuadores**

Un actuador es un dispositivo de naturaleza mecánica que tiene por finalidad proporcionar fuerza para mover o activar otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca que el actuador se active se deriva de cuatro posibles fuentes: manual, presión neumática, presión hidráulica o eléctrica. Según sea el origen de la activación se lo denomina actuador; neumático, hidráulico o eléctrico.

## CAPÍTULO III

### ESTADO ACTUAL DE LA MÁQUINA

Previo al estudio del análisis del estado actual de la máquina y los equipos que esta comprende es necesario saber la funcionabilidad específica que cumplen los mismos. Para esto hemos realizado un ensayo completo de la práctica para verificar la función que realiza cada elemento y a la vez comprobar si estos están operando o se encuentran obsoletos.

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA MÁQUINA

El vibróforo de baja frecuencia es una máquina adecuada para realizar pruebas de fatiga, así como también aplicar cargas para determinar la resistencia de los materiales para los diferentes tipos de ensayos que se pueden ejecutar. A continuación, se detalla las características técnicas de la máquina:

**Tabla 1**

Características técnicas del Vibróforo de baja frecuencia

| <b>Hoja técnica de equipo de laboratorio</b> |  |
|--|--|
| Modelo/Marca:                                | Vibróforo de Baja Frecuencia 417U, AMSLER        |
| Procedencia:                                 | Schaffhausen, Suiza                              |
| Fecha fabricación:                           | 1972   |
| Descripción:                                 | Equipo para ensayos de fatiga en baja frecuencia |
| Capacidad:                                   | Ensayo estático, carga máxima: 10 [Tn]           |
|  | Ensayo dinámico, carga máxima: 10 [Tn]           |
| Requerimientos:                              | 220 [V], Trifásico, Pot 8 1/2 [Hp]               |
| Observaciones:                               | El equipo se encuentra operable                  |

**Nota** Fuente: (Araujo, 2006)

A continuación, se muestra el diagrama del sistema hidráulico del vibróforo de baja frecuencia obtenido de los manuales del fabricante y normalizado bajo la DIN 24300.

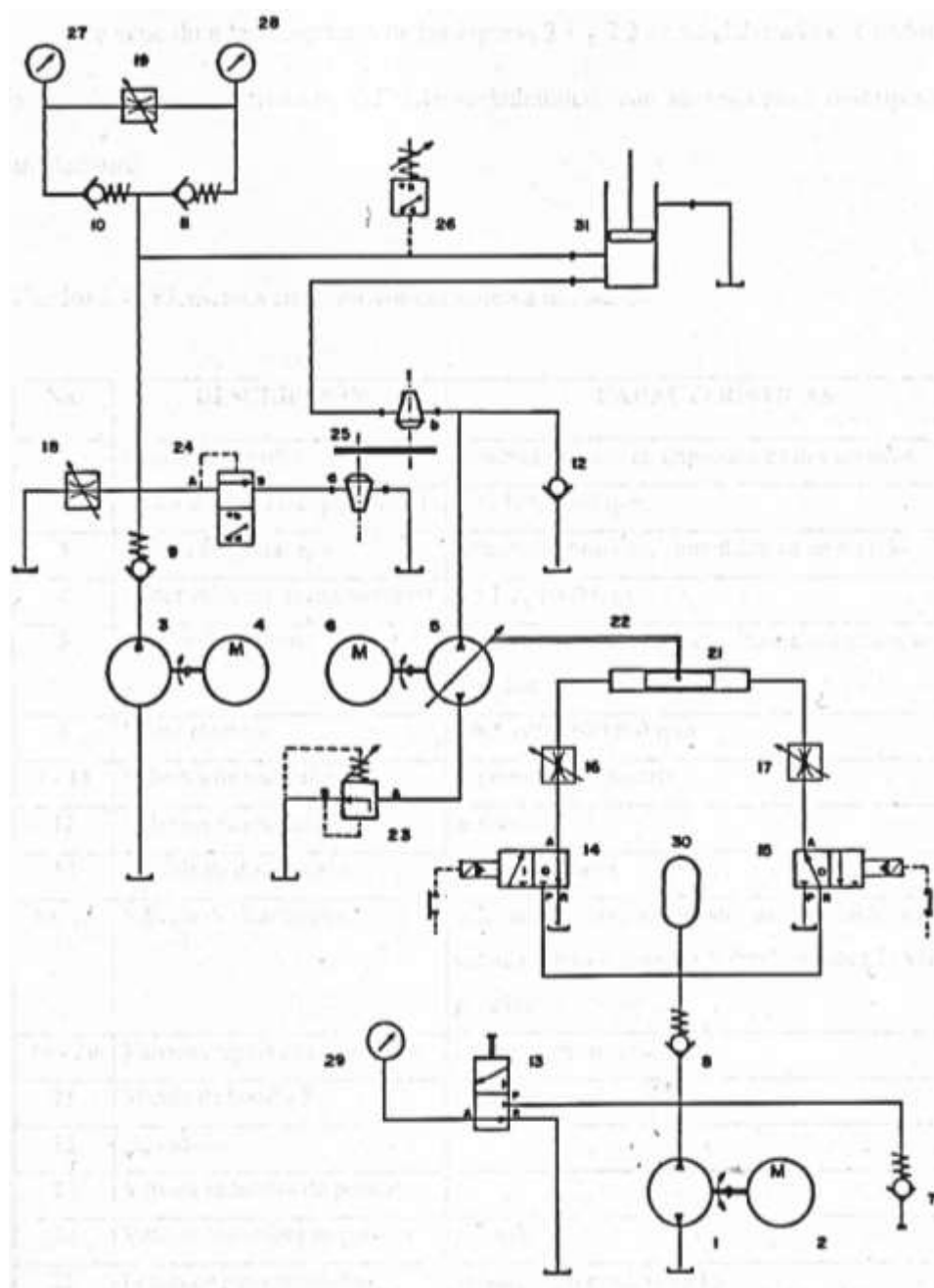


Figura 26 Diagrama del sistema hidráulico  
Fuente: (Alvarado & Montalvo, 1998)

Del diagrama de la Figura 17 se han extraído los elementos de mayor relevancia y se han enlistado en la Tabla 2, indicando la función que este desempeña.

**Tabla 2**

Elementos constitutivos de mayor relevancia de la maquina

| No    | Elementos                      | Función   |
|-------|--------------------------------|---|
| 1     | Bomba de tornillo              | Distribuye el aceite a todo el sistema hidráulico             |
| 5     | Bomba de pistones              | Se utiliza exclusivamente para realizar los ensayos dinámicos |
| 14,15 | Válvulas de distribución 3/2   | Determina el sentido de flujo del aceite                      |
| 16,19 | Válvulas reguladoras de caudal | Regula el caudal de aceite que se distribuye al sistema       |
| 23    | Válvula reductora de presión   | Reduce la presión de la línea                                 |
| 24    | Válvula limitadora de presión  | Mantiene constante la presión de la línea                     |
| 25    | Llaves de paso acopladas       | Selecciona el tipo de ensayo a realizar (dinámico o estático) |
| 31    | Pistón hidráulico              | Aplica la carga sobre el elemento de prueba                   |

Adicionalmente se ha realizado una tabla con los elementos que forman parte del sistema de adquisición de datos:

**Tabla 3**

Elementos del sistema de adquisición de datos

| No | Elementos                  | Función                                       |
|----|----------------------------|---|
| 1  | Sensor LVDT                | Mide el desplazamiento lineal de la viga      |
| 2  | Celda de carga tipo S      | Mide la carga aplicada sobre la viga          |
| 3  | Datalogger RDP Modular 600 | Acondiciona la señal emitida por los sensores |

## **3.2. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LA MÁQUINA**

La máquina cuenta con varios subsistemas tales como: sistemas de instrumentación, transferencia y visualización de datos, elementos de control y fuerza y la estructura de apoyo para vigas, cuyo estado de funcionamiento se detallará a continuación.

### **3.2.1. Sistema de instrumentación**

Para este literal hemos dividido al sistema en dos partes que comprenden la instrumentación que tiene relación con la práctica y la instrumentación que forma parte del equipo generador de cargas (vibróforo).

#### **3.2.1.1. Instrumentación de la práctica**

En la práctica de flexión de vigas necesitamos determinar la carga aplicada a la viga y la variación de distancias en los extremos y el centro de la viga. Para aquello se requiere de una celda de carga para medir la fuerza y de tres sensores de variación lineal (LVDT) para censar las distancias de estos puntos específicos.

El laboratorio de mecánica de materiales cuenta con cada uno de estos sensores que han sido facilitados para ser utilizados como parte del proyecto. Los equipos han sido verificados rigurosamente y hemos llegado a la conclusión de que se encuentran correctamente funcionando y dando rangos de voltajes acorde a las pruebas que hemos realizado con ellos.

En la Figura 27 se puede observar los sensores acoplados en los soportes de vigas.



Figura 27 Acoplamiento de los sensores LVDT a los soportes de vigas

La celda de carga se puede observar en la Figura 19, la misma que se encuentra acoplada al extremo del pistón hidráulico para medir la carga aplicada sobre la viga.



Figura 28 Acoplamiento de la celda de carga al extremo del pistón

### 3.2.1.2. Instrumentación del equipo

El equipo generador de cargas cuenta con un sensor de presión que permite observar en el indicador analógico la carga que es aplicada en la viga.



Figura 29 Sensores análogos de presión

### 3.2.2. Transferencia y visualización de datos

La transferencia y visualización de datos se realiza mediante un datalogger que recepta las señales analógicas de los sensores las procesa y las transfiere hacia un computador mediante una comunicación serial como se indica en la Figura 21. Anteriormente se realizaba la adquisición de estos datos en una hoja de Excel que tenía una programación de Visual Basic utilizando la herramienta de macros de Microsoft Office. Actualmente estos archivos se encuentran desconfigurados por lo que la adquisición de datos no se puede llevar a cabo y no se puede acondicionar los datos de los sensores.



Figura 30 Sistema de adquisición de datos

### **3.2.3. Elementos de control y fuerza**

Actualmente máquina se encuentra funcionando en base a una lógica de contactores y relés empleados tanto para controlar el funcionamiento de sus componentes eléctricos como para la activación de los actuadores y sistemas de medición, cabe mencionar que gran parte de sus componentes son de activación manual.

### **3.2.4. Estructura de apoyo para vigas**

Las estructuras de apoyo para la viga fueron construidas como parte adicional del equipo necesario para la elaboración de la práctica de laboratorio. Consisten en dos perfiles de acero con una base móvil que giran de acuerdo al movimiento de la viga al ser esta deformada.

Adicionalmente cuenta con dos soportes superiores fijos en los cuales se colocan los sensores LVDT para que puedan medir la variación de la deformación. Actualmente los soportes cumplen con su función, pero se observan ligeramente deteriorados por el uso que se les ha dado.

## **3.3. EVALUACIÓN FINAL DE LA MÁQUINA**

Después de haber realizado la práctica en su totalidad y revisado minuciosamente los equipos se pudo concluir que los elementos constitutivos de la máquina y del sistema de adquisición de datos funcionan correctamente pero el funcionamiento integral del sistema no, debido a que no existe una recepción de datos que permita visualizar el resultado esperado de la práctica.

En la Tabla 4 y Tabla 5, se puede observar la evaluación independiente de cada uno de los elementos de la máquina y del sistema de adquisición de datos de mayor relevancia.



**Tabla 4**

Evaluación de los elementos constitutivos

| No    | Elementos                      | Evaluación |
|-------|--------------------------------|------------|
| 1     | Bomba de tornillo              | A          |
| 5     | Bomba de pistones              | B          |
| 14,15 | Válvulas de distribución 3/2   | A          |
| 16,19 | Válvulas reguladoras de caudal | B          |
| 23    | Válvula reductora de presión   | A          |
| 24    | Válvula limitadora de presión  | B          |
| 25    | Llaves de paso acopladas       | A          |
| 31    | Pistón hidráulico              | A          |

**Nota: A=Excelente, B=Bueno, C=Regular y D=Malo****Tabla 5**

Evaluación de los elementos del sistema de adquisición de datos

| No | Elementos                  | Evaluación |
|----|----------------------------|------------|
| 1  | Sensor LVDT                | A          |
| 2  | Celda de carga tipo S      | A          |
| 3  | Datalogger RDP Modular 600 | C          |

**Nota: A=Excelente, B=Bueno, C=Regular y D=Mal**

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO, SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS MECÁNICO, ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO**

Este capítulo estará enfocado al análisis de todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, así como también del diseño de su respectivo sistema de control y adquisición de datos para la selección de los mismos y su posterior implementación.

#### **4.1. DISEÑO DE COMPONENTES MECÁNICOS**

##### **4.1.1. Diseño de matrimonio eje motor**

Este mecanismo es quien permite transmitir la potencia y movimientos de manera directa entre ejes concéntricos dando una relación de transmisión 1:1, es decir no es necesario la utilización de ningún tipo de reductores de velocidad.

Para el diseño del mecanismo antes mencionado, cabe decir que existen varias variables que interfieren para el diseño del mismo, tales como: cálculo del torque del eje transmitido (eje de la válvula reguladora de presión), cálculo del torque del eje transmisor (motor), selección del motor, entre otros.

##### **4.1.1.1. Cálculo del torque (T) requerido**

El torque requerido es un valor importante para la selección del motor quien es el que transmite la potencia hacia el eje de la válvula reguladora de presión con la ayuda de un acople (matrimonio eje-motor).

Este cálculo se lo realizó netamente práctico en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, con la ayuda de un instrumento de medición (Torquímetro).



Figura 31 Medición de torque en eje transmitido

El resultado de la medición realizada dicto lo siguiente:

$$T = 3400 \text{ N.mm}$$

#### 4.1.1.2. Torque total requerido

Este valor maneja un coeficiente de seguridad quien ayudará con la selección del motor y está dado por la siguiente ecuación:

$$T_T = \frac{T}{n}$$

Donde:

$T_T$ : Torque total requerido

$T$ : Torque calculado

$n$ : Factor de eficiencia del motor = 0.9

Por lo tanto:

$$T_T = \frac{3400 \text{ N.mm}}{0,9}$$

$$T_T = 3777,77 \text{ N.mm}$$

#### **4.1.1.3. Selección del motor**

En vista a la necesidad de controlar el caudal de flujo hidráulico y a su vez la regulación de presión, hemos decidido utilizar un actuador eléctrico por su gran capacidad de precisión y control.

Para la regulación de presión se realizó un control de posición, es por esto que lo más óptimo es la utilización de un motor a pasos también llamados motores paso a paso

##### **4.1.1.3.1. Motores a pasos**

Los motores paso a paso son actuadores electromagnéticos que convierten señales digitales (pulsos) en movimiento rotacional, estos pertenecen a la clasificación de motores de corriente continua DC utilizados ampliamente por su gran capacidad de generar movimientos precisos y velocidad controlable.

##### **4.1.1.3.2. Principio de funcionamiento de un motor paso a paso**

Al ser un motor electromagnético su principio de funcionamiento radica en repulsión y atracción de polos magnéticos, en su interior contiene un rotor mismo que esta constituidos por una serie de imanes permanentes y un estator de un cierto número de bobinas excitadoras.

Según sea la constitución del estator este se puede clasificar en Unipolar o bipolar, el control de este tipo de motores es exclusivamente por un controlador extremo tales como:

- Puente H
- Arreglo de transistores tipo Darlington
- Microcontroladores
- Circuitos integrados

La fase de programación de estos motores se detallará en el diseño electrónico.

#### **4.1.1.3.3. Ventajas de un motor paso a paso**

- No recurre a la necesidad de un mantenimiento
- Bajo costo
- No necesita una señal de retroalimentación para su posicionamiento
- Puede arrancar con carga, es decir puede vencer el torque al inicio del movimiento, siempre y cuando este dentro de su rango de trabajo

#### **4.1.1.3.4. Desventajas de un motor paso a paso**

- En comparación con servomotores su fuerza es limitada
- Perdida de pasos cuando la carga a soportar excede su límite de trabajo
- En casos especiales puede existir la necesidad de utilizar un encoder para reconocer el posicionamiento inicial de eje.

#### **4.1.1.4. Selección del motor paso a paso**

Al seleccionar un motor ya sea el tipo que sea, es necesario siempre tener en cuenta algunos factores que puedan afectar el rendimiento del sistema de aplicación, entre estos factores se encuentran:

- Tipo de motor
- Potencia requerida
- Torque de transmisión
- Dimensiones del motor (características físicas)
- Adaptabilidad al ambiente de trabajo
- Tipo de controlador que requiere

Al tomar en cuenta esta diversidad de factores, el motor que más se adapta, más a nuestra necesidad y además a la accesibilidad que presente este es el motor paso a paso Bipolar.

##### **4.1.1.4.1. Requerimientos para la selección del motor**

Tipo de motor: paso a paso Bipolar

Torque de transmisión:  $>3778$  N.mm

Precisión:  $>95\%$

Dimensiones:  $x < 100$  mm,  $y < 100$  mm,  $z < 100$  mm

Temperatura de trabajo:  $<70$  °C

Tipo de controlador: Driver.

Estos factores han sido anteriormente calculados y analizados tanto para proporcionar la potencia, así como también para el espacio designado para la ubicación del motor y facilidad de adaptabilidad al ambiente sin que sufra malos comportamientos en su rendimiento.

#### 4.1.1.5. Motor seleccionado

Debido a los requerimientos necesarios hemos decidido utilizar un motor paso a paso bipolar.

**Tabla 6**  
Características del motor seleccionado

| Tipo                      | Bipolar    |
|---------------------------|------------|
| Torque                    | 4.5 N.m    |
| Apreciación               | 1.8°/pulso |
| Peso                      | 0.71 kg    |
| Dimensiones               | 86x86x86mm |
| Resistencia interna       | 0.7 ohm    |
| Temperatura de trabajo    | <100°C     |
| Alimentación              | >24 [V] DC |
| Corriente en carga máxima | 4.2 [A]    |



Figura 32 Motor a pasos seleccionado

#### 4.1.1.6. Selección del sistema de acople eje motor

Como se pudo apreciar anteriormente se ha calculado el torque necesario para mover al eje de aplicación (eje de válvula reguladora de presión) así como también el torque que puede suministrar el motor a carga máxima.

Al evaluar los valores requeridos tanto como los entregados por el motor nótese que la diferencia no es significativa, al saber que el torque que entregara el motor es suficiente para mover al eje de aplicación sin necesidad de un sistema adicional como: engranajes, cadenas, poleas entre otros, sencillamente utilizaremos la transición de potencia directa con la ayuda de un matrimonio eje motor

La unión entre un eje de aplicación y un eje de motor comúnmente se llama matrimonio, este es un sistema que le permite al eje de aplicación recibir toda la potencia entregada por el motor, en nuestro caso específico transmitirá las revoluciones para regular la presión deseada en el equipo.



Figura 33 Acople eje-motor con ajuste prisionero  
Fuente: (LoveJoy, 2010)

##### 4.1.1.6.1. Calculo del torque nominal

El torque nominal necesario es:

$$T = 3778 \text{ N.mm}$$



Valor necesario para mover la máxima carga, cabe recalcar que este es un valor obtenido experimentalmente.

El torque nominal del motor es:

$$T_{nom} = 4500 \text{ N.m}$$

Este valor fue extraído de la Tabla 6 Como valor máximo que entrega el motor a máxima carga

#### 4.1.1.6.2. Selección del factor de servicio para el acople

La aplicación que tiene el matrimonio es la unión del eje del motor con el eje de una válvula reguladora de presión. Debido a esto se seleccionará un factor de servicio conforme a la tabla de diseño que se indica a continuación:

|   | Service Factors                      |                                  |   |                           |            |
|---|--------------------------------------|----------------------------------|---|---------------------------|------------|
|   | Electric Motor w/<br>Standard Torque | Electric Motor w/<br>High Torque | Steam Turbines & En-<br>gines w/ or more cyl <sup>s</sup> | Reciprocating<br>Engines* |            |
|   |                                      |                                  |   | 1-Cyl                     | 2-Cyl      |
| <b>Feeders</b>                                |                                      |                                  |   |                           |            |
| Belt, Screw .....                             | 1.00                                 | 1.25                             | 1.00  | 1.7                       | 1.3        |
| Reciprocating .....                           | 2.50                                 | 2.75                             | 2.50  | 3.2                       | 2.8        |
| <b>Filter, Press-oil.....</b>                 | <b>1.50</b>                          | <b>1.75</b>                      | <b>1.50</b>   | <b>2.2</b>                | <b>1.8</b> |
| <b>Generators</b>                             |                                      |                                  |   |                           |            |
| Not Welding .....                             | 1.00                                 | 1.25                             | 1.00  | 1.7                       | 1.3        |
| Welding .....                                 | 2.00                                 | 2.25                             | 2.00  | 2.7                       | 2.3        |
| Hoist .....                                   | 1.50                                 | 1.75                             | 1.50  | 2.2                       | 1.8        |
| <b>Hammermills.....</b>                       | <b>2.00</b>                          | <b>2.25</b>                      | <b>2.00</b>   | <b>2.7</b>                | <b>2.3</b> |
| <b>Kilns.....</b>                             | <b>1.50</b>                          | <b>1.75</b>                      | <b>1.50</b>   | <b>2.2</b>                | <b>1.8</b> |
| <b>Laundry Washers —</b>                      |                                      |                                  |   |                           |            |
| Reversing .....                               | 2.00                                 | 2.25                             | 2.00  | 2.7                       | 2.3        |
| <b>Lumber Machinery</b>                       |                                      |                                  |   |                           |            |
| Barkers, Edger Feeder,<br>Live Roll.....      | 2.00                                 | 2.25                             | 2.00  | 2.7                       | 2.3        |
| Planer, Slab Conveyor.....                    | 2.00                                 | 2.25                             | 2.00  | 2.7                       | 2.3        |
| <b>Machine Tools</b>                          |                                      |                                  |   |                           |            |
| Punch Press-gear Driven,<br>Plate Planer..... | 2.00                                 | 2.25                             | 2.00  | 2.7                       | 2.3        |
| <b>Tapping Machinery,</b>                     |                                      |                                  |   |                           |            |
| Bending Roll .....                            | 2.00                                 | 2.25                             | 2.00  | 2.7                       | 2.3        |
| Main Drive .....                              | 1.50                                 | 1.75                             | 1.50  | 2.2                       | 1.8        |
| Auxiliary Drives.....                         | 1.00                                 | 1.25                             | 1.00  | 1.7                       | 1.3        |

Figura 34 Factores de diseño para acoples

Fuente: (LoveJoy, 2010)

Factor de servicio es igual a:

$$n = 1.5$$

Debido a que se trata de un factor de unión para línea de ejes, cuyo valor es igual para una bomba reguladora de caudal.

#### 4.1.1.6.3. Cálculo del torque de diseño

Con el factor de diseño extraído calcularemos el torque de diseño el cual será calculado con la siguiente fórmula:

$$T_{dis} = T_{nom} \cdot n$$

Donde:

$n$ : Factor de servicio

Por lo tanto:

$$T_{dis} = (4500 \text{ N} \cdot \text{mm}) \cdot (1.5)$$

$$T_{dis} = 6750 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

#### 4.1.1.6.4. Determinación del material del acople

Es de suma importancia una buena selección del material del acople ya que este será quien proporcione las adecuadas propiedades para que el sistema no se vea afectado por desplazamientos o roturas que puedan generar pérdidas de potencia en la transición.

A continuación, se muestra una tabla de materiales para el diseño de acoples que varían con respecto a la aplicación y torque de transmisión.

**Tabla 7**  
Lista de materiales para acoples

| Characteristics  | Temperature Range                | Misalignment   |               | Shore Hardness <sup>1</sup>             | Dampening Capacity | Chemical Resistance <sup>2</sup> | Color  |
|--|----------------------------------|----------------|---------------|---|--------------------|----------------------------------|--------|
|  |                                  | Angular Degree | Parallel Inch |   |                    |                                  |        |
| SOX (NBR) Rubber – Nitrile Butadiene (Buna N) Rubber is a flexible elastomer material that is oil resistant, resembles natural rubber in resilience and elasticity and operates effectively in temperature range of -40° to 212° F (-40° to 100° C). Good resistance to oil. Standard elastomer. (Also applies to SXB Cushions.) | -40° to 212° F<br>-40° to 100° C | 1°             | .015          | 80A                                     | HIGH               | GOOD                             | BLACK  |
| URETHANE – Urethane has greater torque capability than NBR (1.5 times), provides less dampening effect, and operates at a temperature range of -30° to 160° F (-34° to 71° C). Good resistance to oil and chemicals. Not recommended for cyclic or start/stop applications.  | -30° to 160° F<br>-34° to 71° C  | 1°             | .015          | 55D<br>L050-L110<br>90-95A<br>L150-L225 | LOW                | VERY GOOD                        | BLUE   |
| HYTREL® – Hytrel is a flexible elastomer designed for high torque and high temperature operations. Hytrel can operate in temperatures of -60° to 250° F (-51° to 121° C) and has an excellent resistance to oil and chemicals. Not recommended for cyclic or start/stop applications.  | -60° to 250° F<br>-51° to 121° C | 1/2°           | .015          | 55D                                     | LOW                | EXCELLENT                        | TAN    |
| BRONZE – Bronze is a rigid, porous oil-impregnated metal insert exclusively for slow speed (maximum 250 RPM) applications requiring high torque capabilities. Bronze operations are not affected by extreme temperatures, water, oil, or dirt.   | -40° to 450° F<br>-40° to 232° C | 1/2°           | .010          | —                                       | NONE               | EXCELLENT                        | BRONZE |

Notes: ■ 1 indicates: NBR standard shore hardness is 80A ±5A – Except L035–60A. Other softer or harder designs are available in NBR material; consult Lovejoy.  
■ 2 indicates: Chemical Resistance chart shown in Engineering Data Section (page ED-9).

**Nota Fuente:** (LoveJoy, 2010)

De esta manera el material seleccionado es Bronce por su buena resistencia mecánica y no presentar problemas al trabajar a temperaturas mayores a 40°C (temperatura habitual de trabajo a la que estaría expuesto el acople). A demás también por su facilidad de mecanizado y accesibilidad de la materia prima.

#### 4.1.1.6.5. Tamaño del acople a seleccionar

Para determinar la longitud del matrimonio nos guiamos en el catálogo para diseño de acoples de “LOVEJOY COUPLING SOLUTIONS” para esto tomamos en cuenta los datos del eje al cual se acoplar el motor entre estos datos están:

- Longitud libre del eje: 36 mm
- Diámetro del eje: 12,2 mm

Así como también el tipo de material y el torque de diseño visto anteriormente cuyos valores son:

- $T_{dis} = 6750 \text{ N.mm}$
- Tipo de material: Bronce

Con el valor del torque de diseño con respecto al material seleccionado verificamos cual es el diámetro máximo del agujero

**Tabla 8**  
Datos del torque de diseño del acople

| Size    | Max Bore |     | Spider Material  |          |                 |       |               |           |               |           |
|---------|----------|-----|------------------|----------|-----------------|-------|---------------|-----------|---------------|-----------|
|         | In       | mm  | SOX (NBR) Torque |          | Urethane Torque |       | Hytrel Torque |           | Bronze Torque |           |
|         |          |     | in-lbs           | Nm       | in-lbs          | Nm    | in-lbs        | Nm        | in-lbs        | Nm        |
| L035    | 0.375    | 9   | 3.5              | 0.4      | —               | —     | —             | —         | —             | —         |
| L/AL050 | 0.625    | 16  | 26.3             | 3.0      | 39              | 4.5   | 50            | 5.60      | 50            | 5.60      |
| L/AL070 | 0.750    | 19  | 43.2             | 4.9      | 65              | 7.3   | 114           | 12.90     | 114           | 12.90     |
| L/AL075 | 0.875    | 22  | 90.0             | 10.2     | 135             | 15.3  | 227           | 25.60     | 227           | 25.60     |
| L/AL090 | 1.000    | 25  | 144.0            | 16.3     | 216             | 24.4  | 401           | 45.30     | 401           | 45.30     |
| L/AL095 | 1.125    | 28  | 194.0            | 21.9     | 291             | 32.9  | 561           | 63.40     | 561           | 63.40     |
| L/AL099 | 1.188    | 30  | 318.0            | 35.9     | 477             | 53.9  | 792           | 89.50     | 792           | 89.50     |
| L/AL100 | 1.375    | 35  | 417.0            | 47.1     | 626             | 70.7  | 1,134         | 128.00    | 1,134         | 128.00    |
| L/AL110 | 1.625    | 42  | 792.0            | 89.5     | 1,188           | 134.0 | 2,268         | 256.00    | 2,268         | 256.00    |
| L150    | 1.875    | 48  | 1,240.0          | 140.0    | 1,860           | 210.0 | 3,708         | 419.00    | 3,706         | 419.00    |
| AL150   | 1.875    | 48  | 1,450.0          | 163.8    | —               | —     | —             | —         | —             | —         |
| L190    | 2.125    | 55  | 1,728.0          | 195.0    | 2,592           | 293.0 | 4,680         | 529.00    | 4,680         | 529.00    |
| L225    | 2.625    | 65  | 2,340.0          | 264.0    | 3,510           | 397.0 | 6,228         | 704.00    | 6,228         | 704.00    |
| L276    | 2.875    | 73  | 4,716.0          | 533.0    | —               | —     | —             | —         | 12,500        | 1,412.00  |
| C226    | 2.500    | 64  | 2,988.0          | 338.0    | —               | —     | 5,940         | 671.00    | 5,940         | 671.00    |
| C276    | 2.875    | 73  | 4,716.0          | 533.0    | —               | —     | 9,432         | 1,066.00  | —             | —         |
| C280    | 3.000    | 76  | 7,560.0          | 854.0    | —               | —     | 13,866        | 1,567.00  | —             | —         |
| C285    | 4.000    | 102 | 9,182.0          | 1,038.0  | —               | —     | 16,680        | 1,882.00  | —             | —         |
| C295    | 3.500    | 89  | 11,340.0         | 1,281.0  | —               | —     | 22,680        | 2,563.00  | 22,680        | 2,563.00  |
| C2955   | 4.000    | 102 | 18,900.0         | 2,136.0  | —               | —     | 37,800        | 4,271.00  | 37,800        | 4,271.00  |
| H3067   | 4.500    | 114 | 33,395.0         | 3,774.0  | —               | —     | 47,196        | 5,333.00  | 47,196        | 5,333.00  |
| H3567   | 5.000    | 127 | 46,632.0         | 5,269.0  | —               | —     | 63,000        | 7,119.00  | 63,000        | 7,119.00  |
| H3667   | 5.629    | 143 | 64,812.0         | 7,323.0  | —               | —     | 88,200        | 9,966.00  | 88,200        | 9,966.00  |
| H4067   | 6.250    | 159 | 88,224.0         | 9,969.0  | —               | —     | 126,000       | 14,237.00 | 126,000       | 14,237.00 |
| H4567   | 7.000    | 178 | 119,700.0        | 13,525.0 | —               | —     | 170,000       | 19,209.00 | 170,000       | 19,209.00 |

Note: ■ Bronze has a maximum RPM capability of 250 RPM.

**Nota Fuente:** (LoveJoy, 2010)

Entonces, de acuerdo a nuestros requerimientos nos situamos en el tamaño L/AL070 que indica que el valor máximo del diámetro de agujero debe ser menor a 19 mm.

#### 4.1.1.6.6. Codificación del acople en función del diámetro agujero para el acoplamiento del eje

Este es el último paso para el diseño y selección de un acoplamiento, para esto nos guiaremos de la siguiente tabla:

**Tabla 9**  
Codificación para acoples

| Bore   | Keyway      | L035  | L050  | L070  | L075  | L090  |
|--------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1/8    | No Keyway   | 10124 | —     | —     | —     | —     |
| 3/16   | No Keyway   | 10126 | —     | —     | —     | —     |
| 1/4    | No Keyway   | 10127 | 10206 | 10416 | 10680 | 10766 |
| 1/4    | 1/8 x 1/16  | —     | —     | —     | 35744 | —     |
| 5/16   | No Keyway   | 10128 | 10207 | 10417 | 10681 | 26209 |
| 3/8    | No Keyway   | 24687 | 10208 | 10418 | 10682 | 10767 |
| 3/8    | 3/32 x 3/64 | —     | 46121 | 41985 | 37234 | 37235 |
| 3/8    | 1/8 x 1/16  | —     | 44136 | 48829 | 35745 | 37236 |
| 7/16   | No Keyway   | —     | 10209 | 10419 | 10683 | 10768 |
| 7/16   | 3/32 x 3/64 | —     | 44713 | 44007 | 28089 | 28877 |
| 7/16   | 1/8 x 1/16  | —     | —     | 44066 | 28875 | 28878 |
| 1/2    | No Keyway   | —     | 10210 | 10420 | 10684 | 10769 |
| 1/2    | 1/8 x 1/16  | —     | 10211 | 10421 | 10685 | 26087 |
| 9/16   | No Keyway   | —     | 10212 | 52338 | 10686 | 24976 |
| 9/16   | 1/8 x 1/16  | —     | 10213 | 10423 | 10687 | 28876 |
| 5/8    | No Keyway   | —     | 10214 | 24771 | 44322 | 46052 |
| 5/8    | 5/32 x 5/64 | —     | —     | 51104 | 37240 | 37241 |
| 5/8    | 3/16 x 3/32 | —     | —     | 10424 | 10688 | 10771 |
| 11/16  | 3/16 x 3/32 | —     | —     | 10425 | 10689 | 10772 |
| 3/4    | No Keyway   | —     | —     | 46116 | 56140 | 54282 |
| 3/4    | 1/8 x 1/16  | —     | —     | 51719 | 35881 | 37246 |
| 3/4    | 3/16 x 3/32 | —     | —     | 10426 | 10690 | 10773 |
| 13/16  | 3/16 x 3/32 | —     | —     | —     | 10691 | 10774 |
| 7/8    | No Keyway   | —     | —     | —     | 56941 | —     |
| 7/8    | 3/16 x 3/32 | —     | —     | —     | 10692 | 10775 |
| 7/8    | 1/4 x 1/8   | —     | —     | —     | —     | 38188 |
| 15/16  | 1/4 x 1/8   | —     | —     | —     | —     | 32332 |
| 1      | 1/4 x 1/8   | —     | —     | —     | —     | 31296 |
| 1      | 3/16 x 3/32 | —     | —     | —     | —     | 37257 |
| 1-1/16 | 1/4 x 1/8   | —     | —     | —     | —     | —     |

Nota Fuente: (LoveJoy, 2010)

Concluyendo que para un diámetro de un agujero de  $\frac{1}{2}$ "  $\approx 12.2$  mm y sin chavetero se seleccionará un acople tipo 10420.

Por consiguiente, diremos que el tipo de acople a utilizar es L070-10420 del catálogo de Lovejoy Coupling Solutions, mismo que se encuentra dibujado con sus características en anexos.

#### 4.1.1.7. Diseño del prisionero para ajuste de acople

El prisionero que utilizaremos forma parte del acoplamiento seleccionado (matrimonio) y será ubicado radialmente en la parte superior del sistema de tal manera que este descansará en la superficie exterior del eje del motor.

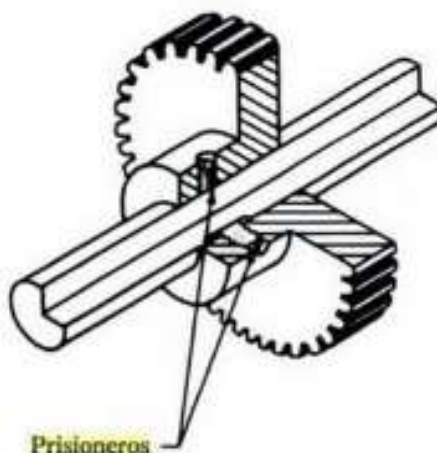


Figura 35 Sujeción con prisioneros

Fuente: (Mott, 2006)

La punta del prisionero puede tener distintas formas según el ensayo que se esté practicando, para nuestro caso y debido a que el eje se encuentra a tracción se debe colocar un prisionero de punta plana que hace que exista más superficie de contacto con el eje, evitando así posibles desplazamientos y a su vez ayuda al sistema con la transmisión de par torsional por la fricción (ajuste) que existe entre la punta del prisionero y el eje. Las posibles

variaciones o pérdidas del momento torsor pueden darse debido a la dureza del material del eje y la fuerza de apriete del tornillo.

Existe la probabilidad que el prisionero se afloje producto de la vibración cuando la maquina esté en funcionamiento es por esto que algunos fabricantes recomiendan el uso de un adhesivo líquido para evitar el aflojamiento.

Para el diseño del prisionero se tiene los siguientes datos:

- Material: Acero de bajo contenido de carbono
- Grado: SAE 2
- Esfuerzo de fluencia: 227 MPa
- Cantidad: 2

A continuación, se muestra el diagrama de cuerpo libre a las que está sometido el prisionero:

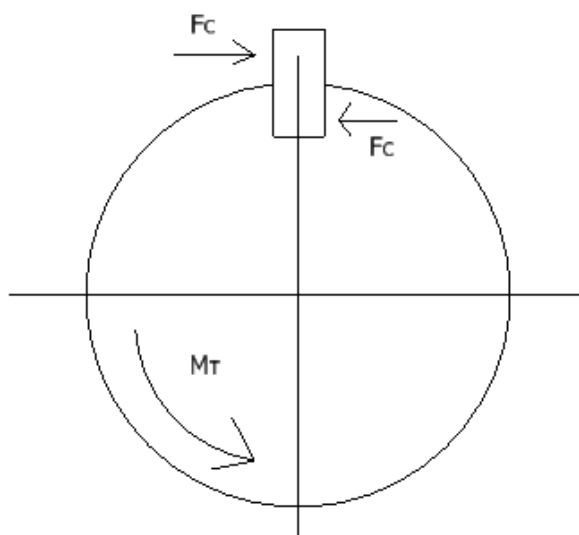


Figura 36 DCG del Prisionero

La fuerza de corte a la que está expuesta el prisionero está dada por la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{M_T}{r_e}$$

Donde:

$F_c$ : Fuerza de corte

$M_T$ : Momento torsor

$r_e$ : Radio del eje

Por lo tanto:

$$F_c = \frac{4500 \text{ N} \cdot \text{mm}}{12.2 \text{ mm}}$$

$$F_c = 368.85 \text{ N}$$

Para determinar la resistencia al esfuerzo cortante utilizaremos la siguiente ecuación en base a la teoría de la energía distorsión:

$$S_{sy} = 0.577(S_y)$$

Donde:

$S_{sy}$ : Esfuerzo cortante

$S_y$ : Límite de fluencia

Por lo tanto:

$$S_{sy} = 0.577 \left( 227 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$S_{sy} = 130.98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Para calcular el esfuerzo de corte a los que están sometidos los prisioneros utilizamos la siguiente ecuación:

$$\tau_c = \frac{F_c}{A_c}$$

Donde:

$\tau_c$ : Esfuerzo de corte

$A_c$ : Área de corte

$F_c$ : Fuerza de corte

Para calcular el diámetro del prisionero se iguala las dos ecuaciones del esfuerzo cortante tomando en cuenta que son dos pernos a diseñar se debe y por ende dos áreas.

$$0.577 \left( 227 \frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F_c}{2 * A_c}$$

$$0.577 \left( 227 \frac{N}{mm^2} \right) = \frac{368.85 N}{2 \left( \frac{\pi \cdot \theta^2}{4} \right)}$$

$$130.98 \frac{N}{mm^2} = \frac{737.7 N}{\pi \cdot \theta^2}$$

$$\theta^2 = \frac{737.7 N}{411.49 \frac{N}{mm^2}}$$

$$\theta = 1.4 mm$$

El diámetro para el prisionero debe ser mayor a 1.4 mm.

Finalmente, elegiremos para nuestra implementación y conforme a los prisioneros existentes en el mercado utilizaremos el prisionero M4x0.7.

#### 4.1.2. Diseño de la base del motor

La base del motor ha sido construida con el fin de proporcionar una correcta posición del motor con respecto al nivel donde se le empotro además que ayuda con la concentricidad que debe tener con el eje conducido. Esta base evita los posibles desplazamientos que puedan provocar fallas en el posicionamiento del eje del motor.



Figura 37 Base del motor

Para la construcción de la base se utilizó:

- Plancha de acero de 3mm de espesor
- Perfil ángulo de acero de 3 mm de espesor

Estos materiales han sido trazados de acuerdo a las dimensiones necesarias con respecto al motor que va a soportar.



Figura 38 Corte de plancha de acero

Estos materiales han sido unidos mediante soldadura de arco eléctrico con material de aporte (electrodo 6011).

Para verificar la factibilidad del diseño se ha sometido a una simulación mediante software de elementos finitos (Inventor AutoDesk) donde se mostraron los siguientes resultados:

Carga aplicada: 4.5 N.m

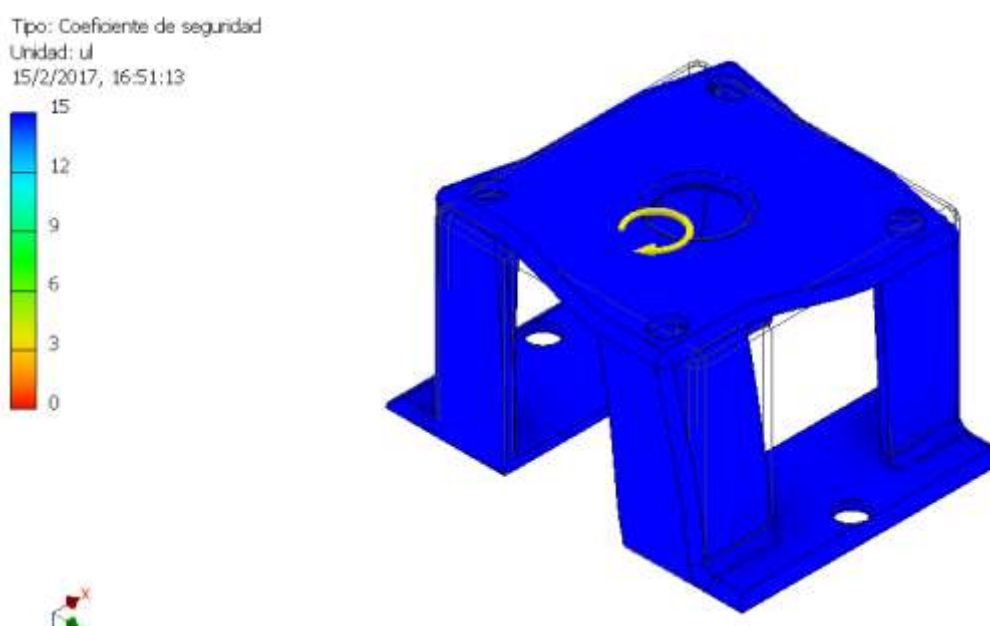


Figura 39 Coeficiente de seguridad

El coeficiente de seguridad es un valor alto (15) esto quiere decir que la estructura diseñada no tendrá problema cuando se le aplique el momento máximo.

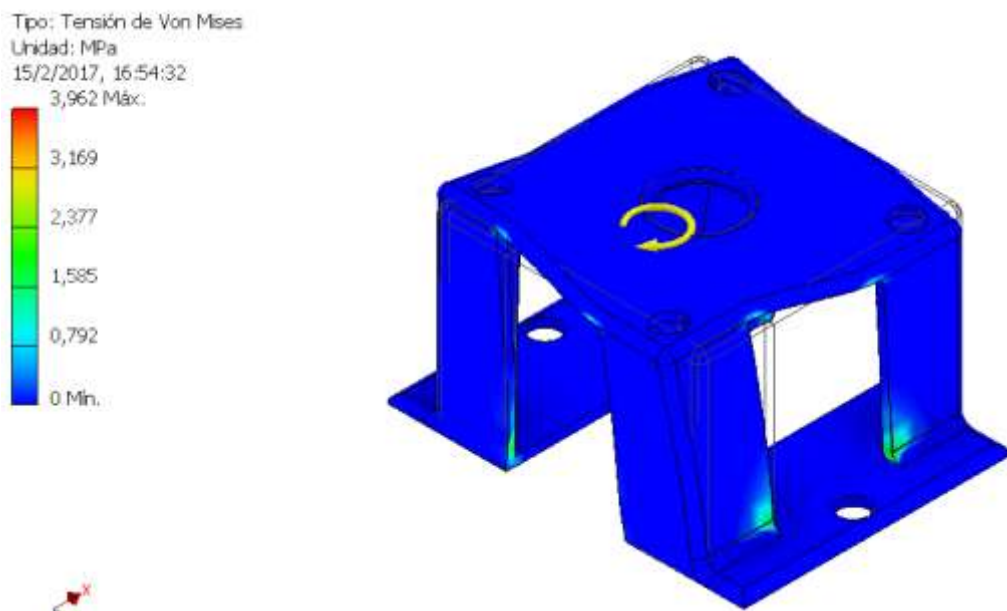


Figura 40 Combinación de esfuerzos

En el análisis de esfuerzos la estructura no presenta fisuras ni daños en las uniones, el material utilizado así como también el tipo de unión ha sido el apropiado.

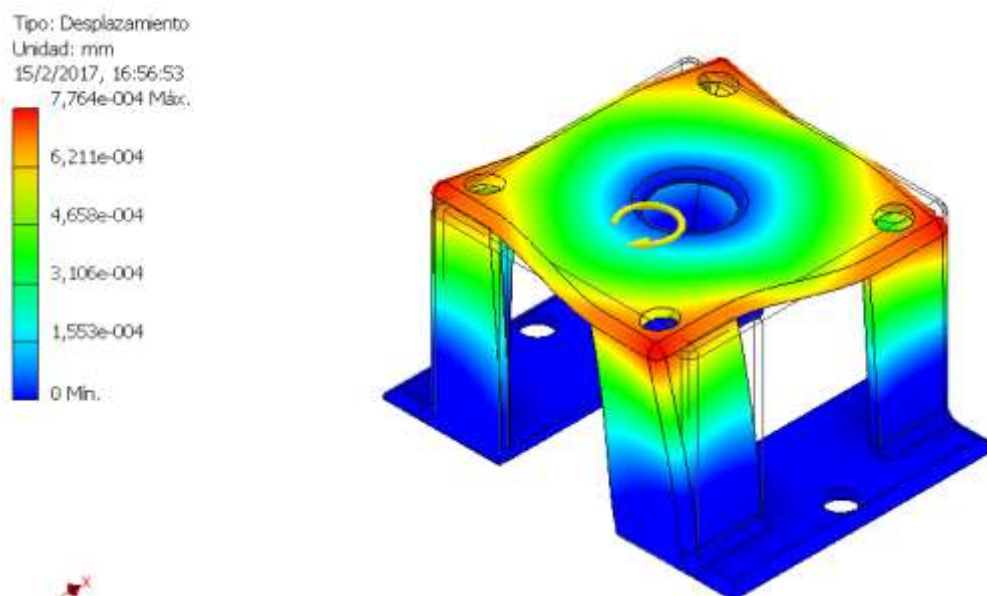


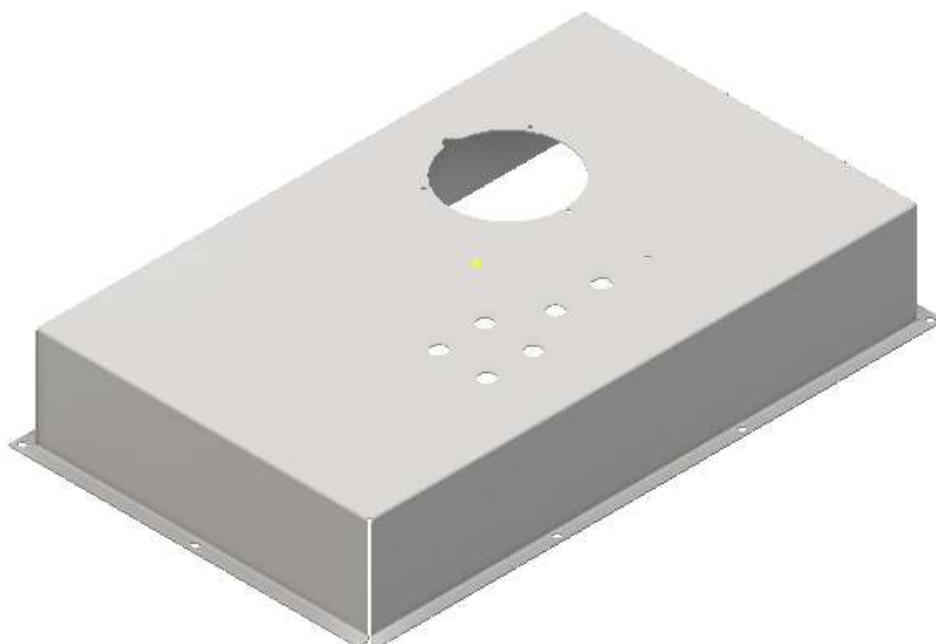
Figura 41 Desplazamiento de la base del motor

El valor de desplazamiento es casi nulo e inapreciable visiblemente debido a que está bajo 0.000001mm de desplazamiento.

Los planos del diseño, así como también el modelamiento de la estructura se encuentran en el anexo.

#### 4.1.3. Construcción del tablero sobre mesa

Este tablero fue diseñado de manera que pueda contener todo el panel manual y a la vez que no afecte el aspecto físico de la máquina ya que este va a tener contacto directo con el usuario.



*Figura 42 Modelado del tablero sobre mesa*

El tablero fue construido en base a una plancha de acero de 1.2 mm de espesor, mismo que evita el pandeo cuando el panel es utilizado manualmente, los métodos utilizados para la construcción de este fueron:

- Cortado con sierra
- Trazado troquelado del diseño

- Plegado con dobladora
- Perforado de agujeros
- Pintado y secado en horno



Figura 43 Pintado y secado en horno

Los planos dimensionales del diseño, así como también el modelamiento de la estructura se encuentran en el anexo.

#### **4.2. DISEÑO DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL**

El proyecto desarrollado tiene un sistema de control gobernado por un Procesador de PLC seleccionado de acuerdo a las necesidades requeridas que se mencionan a continuación:

Entradas digitales:

- Llave de seguridad
- Válvula de alivio de presión
- Inicio de proceso

- Pausa de proceso
- Botón de emergencia
- Sensor de carga máxima
- Sensor home

#### Entadas análogas

- Potenciómetro control de carga

#### Salidas 24 VDC

- Llave de seguridad
- Indicador luminoso de válvula de alivio
- Inicio de proceso
- Pausa de proceso

#### Salidas 120 VAC

- Botón de emergencia
- Válvula de alivio de presión

En resumen, se necesitó un procesador que cuente con:

- 7 entradas digitales
- 1 entrada analógica
- 4 salidas de 24 V
- 2 Salidas de 120 V
- Módulo de salidas digitales de alta frecuencia

#### **4.2.1. Selección del PLC**

Se seleccionó un Procesador Siemens Simatic S7 1200 debido a que cuenta con las siguientes características:

**Tabla 10**  
Características PLC S7 1200

**Simatic S7 1200**

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Modelo                         | CPU 1212C AC/DC/RLY               |
| Alimentación                   | 100/220VAC                        |
| Entradas digitales             | 8 DI a 24 VDC                     |
| Salidas                        | 6 DO tipo relé                    |
| Entradas análogas              | 2 AI (0-10 VDC)                   |
| Puerto de comunicación         | ProfiNet/Industrial Ethernet RJ45 |
| Capacidad máxima de ampliación | Hasta 1 signal Board              |

**4.2.1.1. Distribución física de entradas y salidas**

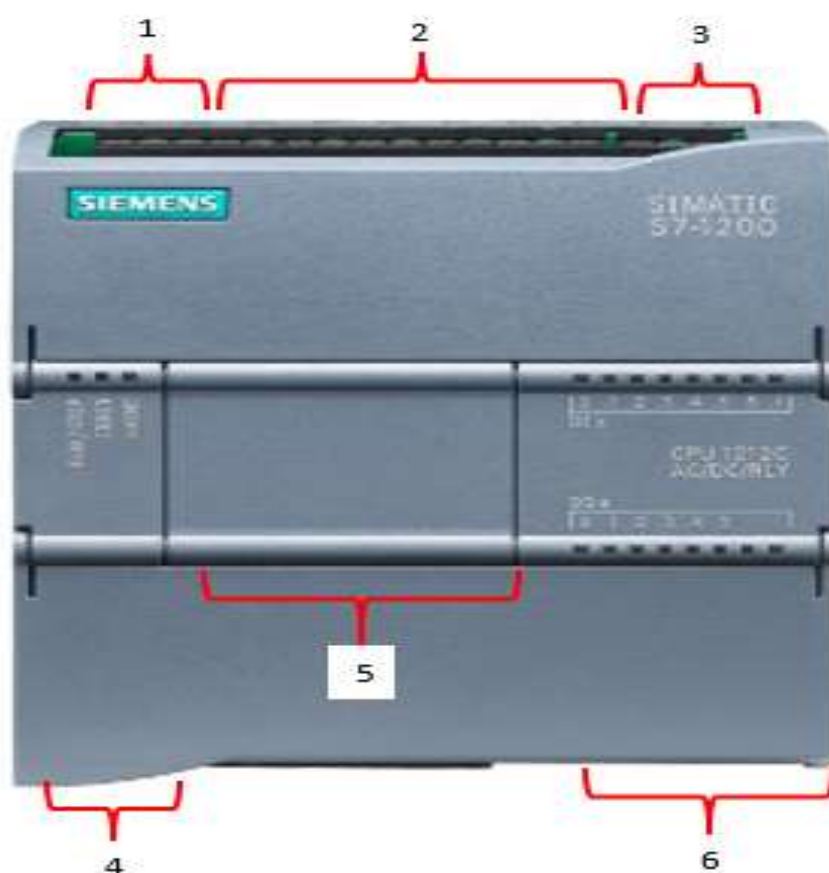


Figura 44 Distribución física de I/O



1. Pines de energización
2. Entradas digitales
3. Entradas analógicas
4. Puerto Ethernet
5. Puerto de ampliación (Signal board)
6. Salidas tipo relé

Después de haber seleccionador el procesador a utilizar hemos esquematizado las variables (entradas/salidas) que se van a utilizar dentro del programa como se indica a continuación:



Figura 45 Distribución física del controlador

### 4.3. DISEÑO DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

#### 4.3.1. Diseño de circuito analog input

La presión ejercida por el pistón está controlada por una señal análoga procedente de un potenciómetro de precisión. Este está conectada al puerto AI0 del PLC que recepta datos mediante variaciones de voltaje de 0 a 10 VDC como se indicó en la tabla 10 de las especificaciones del PLC. Por tal motivo se diseñó un módulo que asegura que el voltaje que entre a dicho puerto no exceda los límites establecidos.

El siguiente diagrama muestra el funcionamiento de un divisor de voltaje con una alineación de 24 VDC que va reduciéndose conforme pasa por R1 y R2 equivalente a  $2.8\text{ k}\Omega$ , y en un potenciómetro de precisión de  $2\text{ k}\Omega$  que realiza la función de control manual de presión ejecutada través de un motor a pasos:

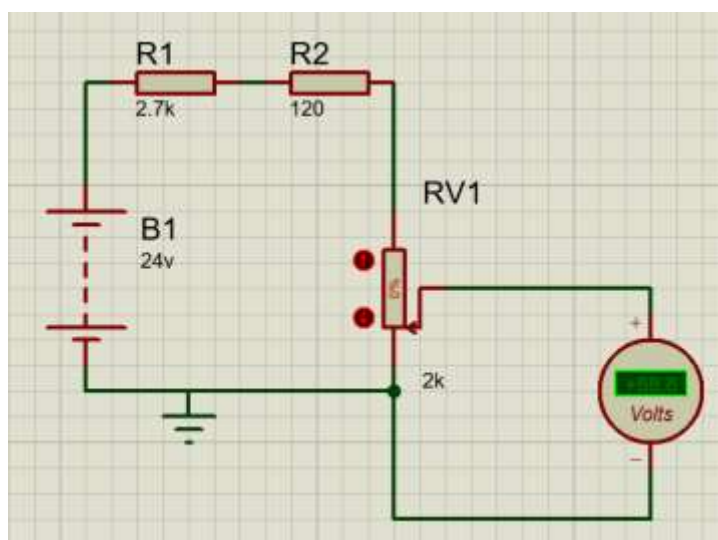


Figura 46 Simulación Fuente DC 24 V

El potenciómetro de precisión es el punto de medida para recepción de datos (variación de voltaje) que recibe el procesador para realizar el giro del motor y variar la presión.

A continuación, se muestra el circuito eléctrico diseñado para obtener los rangos de voltaje admitidos por el procesador.

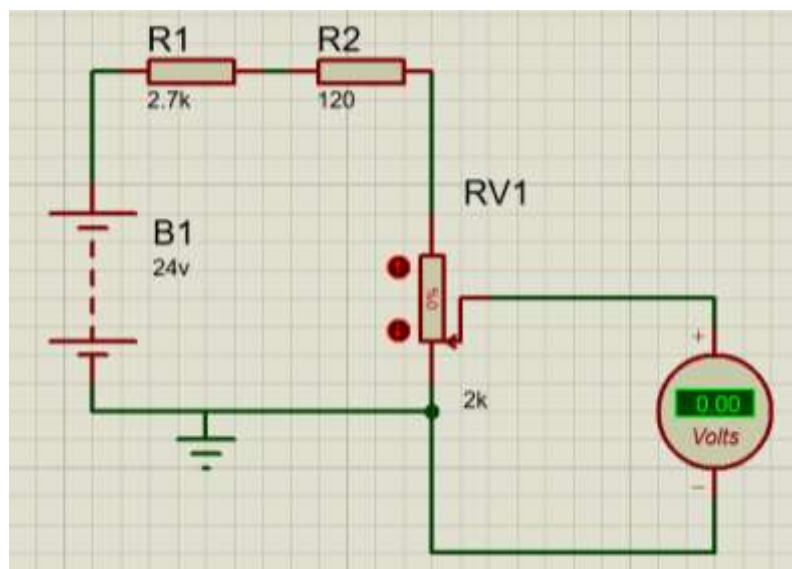


Figura 47 Circuito de entrada analógica al 0%

En la imagen anterior se observa que el potenciómetro está con 0% de carga en ohmios y el voltaje de salida en 0 VDC, es decir que el pistón de carga no está aplicando presión.

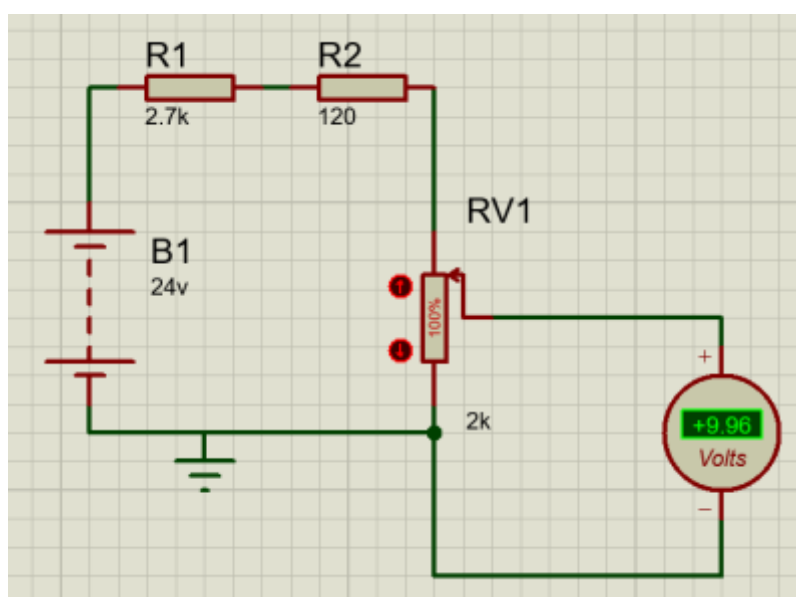


Figura 48 Circuito de entrada analógica al 100%

En la figura 41 observamos que el potenciómetro está al 100% lo que dicta un voltaje de salida de  $9.96 \approx 10$  VDC, dando una presión máxima de trabajo 8.424 Tn.

#### 4.3.2. Diseño de secuencia de motor a pasos

El motor utilizado es un motor a pasos bipolar cuya característica especial es que los bobinados deben ser excitados con una secuencia definida para que el motor gire en el sentido deseado, esto hace necesario el uso de un driver para generar la secuencia.

Previo a realizar la configuración de secuencia es indispensable la identificación de los cables A+, A-, B+, B-, para esto es necesario la utilización de un multímetro para comprobar continuidad e identificar las bobinas, así se supo que los terminales A- y A+ pertenecen a la bobina A de la misma forma que los terminales B- y B+ a la bobina B.



Figura 49 Identificación de bobinas

Para realizar el control de este tipo de motores se debe invertir las polaridades de los terminales de cada bobina en una secuencia determinada

para obtener un giro a derecha y otra secuencia opuesta para lograr que gire en sentido contrario, la secuencia adoptada es la siguiente.

**Tabla 11**

Secuencia de giro de motor a pasos

| # Paso | A+  | A-  | B+  | B-  |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| 1      | VCC | GND | VCC | GND |
| 2      | VCC | GND | GND | VCC |
| 3      | GND | VCC | GND | VCC |
| 4      | GND | VCC | VCC | GND |

#### 4.3.3. Driver Xinje DP-508

Es un circuito controlador bipolar de motores paso a paso que le permite manejar un motor de hasta 5A de corriente desde cualquier Procesador.

Este driver satisface las necesidades en innumerables aplicaciones entregando especialmente un rendimiento perfecto en los dispositivos que requieren bajo ruido, vibración, alta precisión y velocidad.

**Tabla 12**

Características de funcionamiento del driver

| Especificaciones                       | Valor mínimo           | Valor máximo |
|--|------------------------|--------------|
| Fuente de alimentación                 | 20                     | 80           |
| Valor de la corriente de salida        | 0                      | 5            |
| Corriente de entrada lógica (mA)       | 4                      | 16           |
| Frecuencia del pulso paso a paso (KHz) | 0                      | 200          |
| Máxima temperatura de trabajo          | 70 °C                  |              |
| Dimensiones                            | 138 mm x 85 mm x 38 mm |              |

El cumplimiento de las características anteriormente mencionadas asegura un correcto funcionamiento para la aplicación diseñada.

#### 4.3.3.1. Terminales de entrada y salida del driver

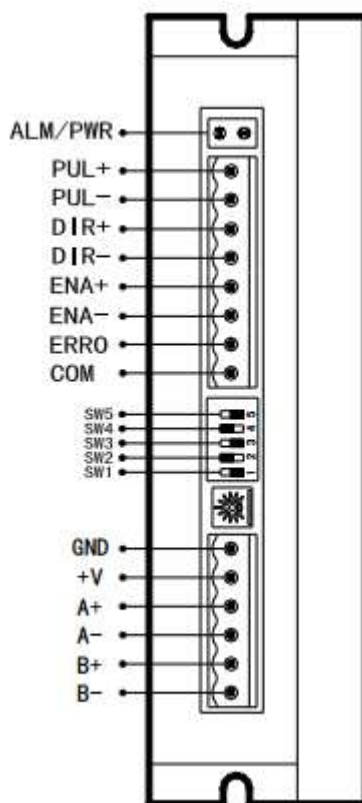


Figura 50 Descripción de entradas y salidas del driver  
Fuente: (Xinje, 2012)

#### 4.3.3.2. Descripción de terminales de señales de control

**Tabla 13**

Descripción de terminales de señales de control

| Señal | Función                      | Descripción   |
|-------|------------------------------|---|
| PUL+  | Control de señales de pulsos | El motor se mueve un paso en el flanco descendente del pulso girando de nivel bajo a nivel alto |
| PUL-  |                              |   |

**Continua →**

|             |  |  |
|-------------|--|--|
| DIR+        | Dirección de señales de control          | La dirección de rotación del motor cambiada por el giro del pulso entre el nivel bajo y el nivel alto.   |
| DIR-        |  | Una vez que se cambia el estado del pulso, la dirección gira en consecuencia. La dirección original depende del cableado del motor, que significa la conexión de fase.   |
| ENA+        | Habilitar o liberar señal                | Se utiliza para la liberación del motor. El motor no estará activo cuando el terminal ENA + se conecte a 24V y ENA- se conecte a bajo nivel, en este caso, el conductor corta la corriente de todas las fases. |
| ENA-        |  | De lo contrario, desconectando el terminal significa que el motor está Habilitado todo el tiempo   |
| ERRO<br>COM | Mal funcionamiento de la señal de salida | La señal de anomalía es transmitida por el ERRO y el terminal COM cuando se produce sobretensión o subtensión.   |

Para garantizar la fiabilidad de la respuesta del sistema se debe tomar en cuenta las siguientes instrucciones de funcionamiento:

- La señal de alto es efectiva siempre y cuando el voltaje de entrada es de 24V y la señal de nivel bajo este dentro de un intervalo de 0 a 0.5 V, para asegurar esta instrucción se ha diseñado un módulo de tal forma de entregue los valor exactos.
- La señal ENA (habilitar) debe ser activada a nivel alto 3 segundos antes de la señal DIR (dirección) o más.
- El ancho del pulso debe ser superior a 1,2 $\mu$ s.
- La duración del pulso de bajo nivel debe ser superior a 1,2  $\mu$ s.

#### 4.3.3.3. Descripción de terminales del circuito de potencia



**Tabla 14**

Descripción de terminales del circuito de potencia

| Terminal      | Función                        | Descripción  |
|---------------|--------------------------------|--|
| <b>GND</b>    | Terminal de tierra DC          | Terminal de tierra DC  |
| <b>+V</b>     | Terminal positivo de fuente DC | Fuente de alimentación del bobinado entre 20 y 80 V                          |
| <b>A+, A-</b> | Bobina A del motor             | Dirección del motor cambiada por el giro del terminal A + y del terminal A-. |
| <b>B+, B-</b> | Bobina B del motor             | Dirección del motor cambiada por el giro del terminal B + y del terminal B-. |

Para asegurar el funcionamiento de la parte de potencia proporcionada por el driver se ha seleccionado una fuente que tiene las características eléctricas dentro de los rangos permitidos es decir:

- Voltaje de alimentación: 110/220 V
- Voltaje de salida: 36 VDC
- Corriente salida: 12.5 A



Figura 51 Fuente de voltaje DC  
Fuente: (SparkFun Electronics, 2016)

#### 4.3.4. Diseño de módulo de modulo para activación en nivel bajo y alto efectivo

Para la activación de los terminales ENA+ y ENA- quienes necesitan una señal de voltaje exacta de 24V Y 0V respectivamente, se ha diseñado un módulo que proporciones estos valores.

A continuación, se muestra el circuito diseñado en colector común de cuatro bloques:

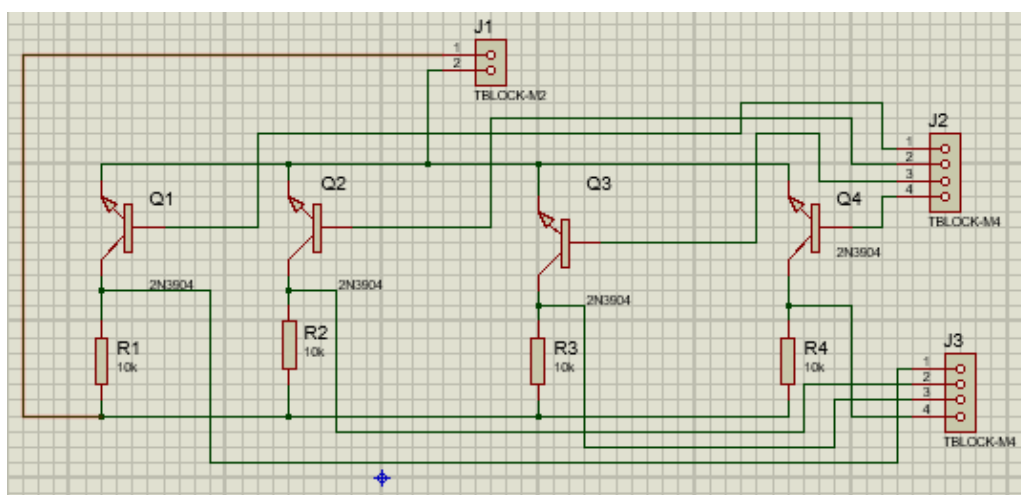


Figura 52 Módulo de activación en bajo y alto (Emisor común)

Este circuito funciona en dependencia de la señal salida del PLC (5V) correspondiente a la bornera J2 que es inducida en la base del transistor 2N3904, a su vez el colector recibe una señal de voltaje de 24V proveniente de la fuente MiWi S-360-24 en la bornera J3 para que el transistor envíe las señales de 24V y 0V a los terminales de control del driver ENA+ y ENA- respectivamente.

#### 4.3.5. Emisor de pulsos para configuración de driver

El PLC Siemens S7-1200 CPU-1212C posee salidas tipo relé cuya frecuencia de salida de voltaje es muy baja impidiendo realizar un correcto

control del motor, por tal motivo se ha utilizado el módulo de ampliación Signal Board SB1222 de salidas digitales de 200 kHz de frecuencia.



Figura 53 Módulo de ampliación de I/O  
Fuente: (SIEMENS, 2017)

Datos importantes:

- Voltaje de salidas: 5 VDC
- Número de entradas/salidas: 4
- Número de salidas digitales: 4
- Corriente nominal de salida: 50 mA
- Frecuencia de salida: 200 KHz
- Series compatibles: S7 1200

Como limitante de este módulo de ampliación es que solo admite un voltaje máximo de entrada de 5 VDC, para lo cual se ha diseñado un regulador de voltaje como se indica a continuación:

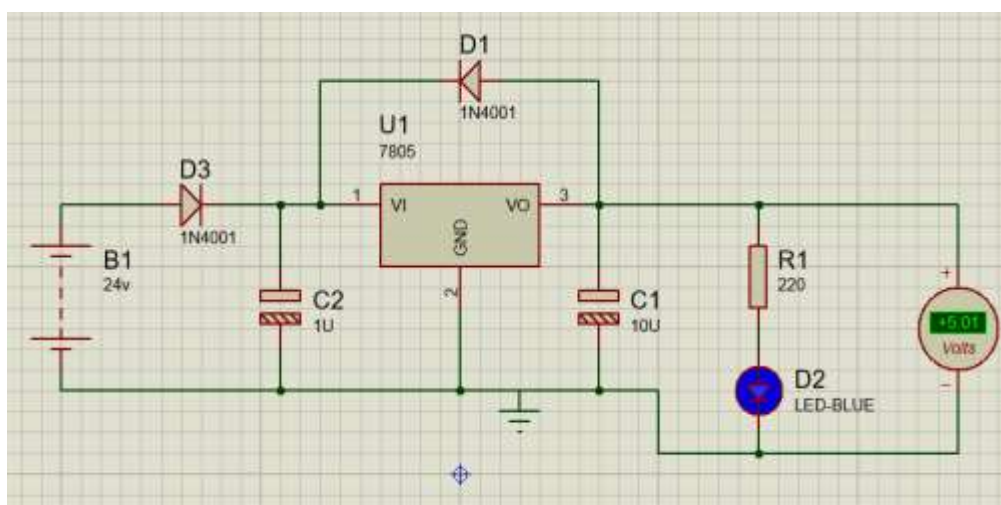


Figura 54 Simulación módulo regulador a 5 VDC

Este regulador está implementado en base a un integrado LM7805 que ajusta el voltaje de entrada (24 VDC) proveniente de la fuente propia del PLC regulándolo a 5 VDC que es lo que necesita el Módulo de ampliación.

#### 4.3.6. Diseño de elementos de protección

Para el dimensionamiento de los elementos de protección (fusibles), no ayudaremos de la siguiente desigualdad:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

Donde:

$I_b$ : Corriente del circuito diseñado

$I_n$ : Corriente nominal del fusible (Valores comerciales)

$I_z$ : Corriente máxima permitida por el cable conductor

Esta desigualdad indica que en la práctica el fusible debe dejar pasar la corriente necesaria para que todo el circuito funcione pero no permite el paso de corriente que pueda provocar daños en el sistema eléctrico

#### 4.3.6.1. Dimensionamiento de fusibles

En todo el sistema diseñado el elemento que requiere máxima corriente es el motor, quien exige un valor máximo de corriente de 4.2 A a plena carga por lo tanto:

$$I_b = 4.2 A$$

(Corriente de diseño)

A demás el cable seleccionado como conductor es el AWG 18 de cobre cuenta con las siguientes características.

**Tabla 15**

Intensidad de corriente máxima en cables conductores

| INTENSIDAD DE CORRIENTE ADMISIBLE PARA CONDUCTORES DE COBRE<br>(Secciones AWG) |          |                                    |      |      |                                    |      |      |         |
|--|----------|------------------------------------|------|------|------------------------------------|------|------|---------|
| AISLADOS TEMPERATURA DE SERVICIO: 60° 75° 90°C                                 |          |                                    |      |      |                                    |      |      |         |
| SECCION  | SECCION  | GRUPO A<br>TEMPERATURA DE SERVICIO |      |      | GRUPO B<br>TEMPERATURA DE SERVICIO |      |      | DESNUDC |
| Nominal<br>(mm)2   | AWG      | 60°C                               | 75°C | 90°C | 60°C                               | 75°C | 90°C |         |
| 0,32   | 22       | 3                                  | 3    |      |                                    |      |      |         |
| 0,51   | 20       | 5                                  | 5    |      |                                    |      |      |         |
| 0,82   | 18       | 7,5                                | 7,5  |      |                                    |      |      |         |
| 1,31   | 16       | 10                                 | 10   |      |                                    |      |      |         |
| 2,08   | 14       | 15                                 | 15   | 25   | 20                                 | 20   | 30   |         |
| 3,31   | 12       | 20                                 | 20   | 30   | 25                                 | 25   | 40   |         |
| 5,26   | 10       | 30                                 | 30   | 40   | 40                                 | 40   | 55   |         |
| 8,36   | 8        | 40                                 | 45   | 50   | 55                                 | 65   | 70   | 90      |
| 13,30  | 6        | 55                                 | 65   | 70   | 80                                 | 95   | 100  | 130     |
| 21,15  | 4        | 70                                 | 85   | 90   | 105                                | 125  | 135  | 150     |
| 26,67  | 3        | 80                                 | 100  | 105  | 120                                | 145  | 155  | 200     |
| 33,62  | 2        | 95                                 | 115  | 120  | 140                                | 170  | 180  | 230     |
| 42,41  | 1        | 110                                | 130  | 140  | 165                                | 195  | 210  | 270     |
| 53,49  | 1/0      | 125                                | 150  | 155  | 195                                | 230  | 245  | 310     |
| 67,42  | 2/0      | 145                                | 175  | 185  | 225                                | 265  | 285  | 360     |
| 85,01  | 3/0      | 165                                | 200  | 210  | 260                                | 310  | 330  | 420     |
| 107,2  | 4/0      | 195                                | 230  | 235  | 300                                | 360  | 385  | 490     |
| 127  | 250 MCM  | 215                                | 255  | 270  | 340                                | 405  | 425  | 540     |
| 152,0  | 300 MCM  | 240                                | 285  | 300  | 375                                | 445  | 480  | 610     |
| 177,3  | 350 MCM  | 260                                | 310  | 325  | 420                                | 505  | 530  | 670     |
| 202,7  | 400 MCM  | 280                                | 355  | 360  | 455                                | 545  | 575  | 730     |
| 253,4  | 500 MCM  | 320                                | 380  | 405  | 515                                | 620  | 660  | 840     |
| 304  | 600 MCM  | 355                                | 420  | 455  | 475                                | 690  | 740  |         |
| 354,7  | 700 MCM  | 385                                | 460  |      | 630                                | 755  |      |         |
| 380  | 750 MCM  | 400                                | 475  | 500  | 655                                | 785  | 845  |         |
| 405,4  | 800 MCM  | 410                                | 490  |      | 680                                | 815  |      |         |
| 456  | 900 MCM  | 435                                | 520  |      | 730                                | 870  |      |         |
| 506,7  | 1000 MCM | 455                                | 545  | 585  | 780                                | 925  | 1000 |         |

**Nota Fuente:** (Cableeléctricos, 2015)

De la tabla 14 extraemos el valor de corriente máximo admisible de cable conductor para el diseño:

$$I_z = 7.5 A$$

Por lo tanto:

$$4.2 A \leq I_n \leq 7.5 A$$

Para encontrar un fusible comercial verificaremos la tabla 16 un valor que se encuentre dentro del intervalo señalado.

**Tabla 16**

Valores nominales de fusibles comerciales

|     |     |     |     |     |     |     |      |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 2   | 4   | 6   | 10  | 16  | 20  | 25  | 35   |
| 40  | 50  | 63  | 80  | 100 | 125 | 160 | 200  |
| 250 | 315 | 400 | 425 | 500 | 630 | 800 | 1000 |

**Nota** Fuente: (Vaikon, 2013)

De la tabla escogimos un fusible cerámico de 6 A que se encuentra dentro de los rangos de trabajo

#### 4.4. DISEÑO DEL SOFTWARE

##### 4.4.1. Adquisición y procesamiento de datos

Hoy en día existen diferentes tipos de tecnología que permiten una comunicación a una pc, bien sea para enviar o recibir datos y para ser acondicionados según sea el caso, entre los puertos más conocidos se encuentran: PCI, USB Puerto serial, Ethernet, firewire entre otros. Dentro de los anteriores tipos destacan el USB y el Puerto serial por su costo accesible, fácil uso y configuración automática.

Para nuestro caso el sistema de adquisición de datos será diseñado en base a una interface de Puerto serial con la ayuda de un acondicionador RDP, el cual permitirá leer en tres canales diferentes los datos de los tres sensores LVDT'S y un canal para lectura de la celda de carga, además servirá de acondicionador entre los sensores y una aplicación desarrollada en Matlab mediante una programación tipo M.



Figura 55 Acondicionador RDP Datalogger

Los diferentes aspectos utilizados para el sistema de adquisición se detallaran a lo largo del presente capitulo.

#### **4.4.1.1. Resolución y Sensibilidad**

##### **4.4.1.1.1. Resolución**

Este término está definido como el mínimo incremento de cantidad que se puede medir con certeza.

##### **4.4.1.1.2. Sensibilidad**

Es el incremento más pequeño que puede ser detectado por un medidor, pero esto no significa que este cambio en el incremento pueda ser mostrado por el equipo medidor a la persona que esté realizando el censo de un ensayo.

La sensibilidad también puede definirse como una relación del cambio incremental en la salida para un cambio incremental en la entrada.

#### 4.4.1.2. Tensión salida de fondo de escala

Para nuestro caso y con el equipo a disposición se tienen las siguientes especificaciones de funcionamiento.

**Tabla 17**

Características de funcionamiento de la celda de carga

#### **CELDA DE CARGA**

|  |                  |
|--|------------------|
| Rango de trabajo                         | >20 Klb          |
| Rango de voltaje de excitación aceptable | 0-15 [V]         |
| Volteje de calibración (Recomendado)     | 15 [V]           |
| Valor mínimo de muestreo (sensibilidad)  | 3 mV/V $\pm$ 10% |
| Error de linealidad                      | $\pm$ 0.03%      |
| Histéresis                               | $\pm$ 0.03%      |
| Repetibilidad                            | $\pm$ 0.03%      |
| Resolución                               | Infinita         |
| Temperatura de trabajo                   | -20 °C a 60 °C   |



Figura 56 Celda de carga



**Tabla 18**

Características de funcionamiento de LVDT RDP ACT2000C

**LVDT RDP ACT2000C (sensor de desplazamiento)**

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Rango de voltaje de excitación aceptable | $\pm 50\text{mm}$             |
| Volteje de calibración (Recomendado)     | 10 [V]                        |
| Valor mínimo de muestreo (sensibilidad)  | 1.5 mV/V                      |
| Error de linealidad                      | $<\pm 0.5/\pm 0.25/\pm 0.1\%$ |
| Temperatura de trabajo                   | -20 °C a 60 °C                |

*Figura 57 LVDT RDP ACT2000C***Tabla 19**

Características de funcionamiento de LVDT RDP ACT4000C

**LVDT RDP ACT4000C (sensor de desplazamiento)**

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Rango de voltaje de excitación aceptable | $\pm 100\text{mm}$            |
| Volteje de calibración (Recomendado)     | 10 [V]                        |
| Valor mínimo de muestreo (sensibilidad)  | 3.2 mV/V                      |
| Error de linealidad                      | $<\pm 0.5/\pm 0.25/\pm 0.1\%$ |
| Temperatura de trabajo                   | -20 °C a 60 °C                |



*Figura 58 LVDT RDP ACT4000C*

Para nuestros sensores el valor de voltaje de salida entregado por el equipo a máxima carga viene dado por:

$$\textit{Sensibilidad Especifica} = \frac{\textit{Tension de salida fondo de escala}}{\textit{Tension de Calibracion}}$$

Donde:

*Sensibilidad Especifica*: (Valor propio del equipo), definido como el mínimo incremento de cantidad que se puede medir.

*Tension de salida fondo de escala*: Valor de voltaje entregado por el acondicionador de señal a máxima carga.

*Tension de Calibracion*: Valor recomendado por el fabricante para realizar la calibración del sensor a utilizar.

Por lo tanto para el caso de la calibración de los sensores de desplazamiento LVDT'S ACT2000C:

Datos:

$$\text{Sensibilidad Especifica} = 1.5 \text{ mV/V}$$

$$\text{Tension de Calibracion} = 10 \text{ V}$$

Entonces:

$$2 \text{ mV/V} = \frac{\text{Tension de salida fondo de escala}}{10 \text{ V}}$$

$$\text{Tension de salida fondo de escala} = 1.5 \frac{\text{mV}}{\text{V}} * 10 \text{ V}$$

Esto quiere decir que cuando el desplazamiento es el máximo

$$d = \pm 50 \text{ mm}$$

$$\text{Tension de salida fondo de escala} = 15 \text{ mV}$$

Mientras que para el caso de la calibración del sensor de desplazamiento LVDT'S ACT4000C:

Datos:

$$\text{Sensibilidad Especifica} = 3.2 \text{ mV/V}$$

$$\text{Tension de Calibracion} = 10 \text{ V}$$

Entonces:

$$3.2 \text{ mV/V} = \frac{\text{Tension de salida fondo de escala}}{10 \text{ V}}$$

$$\text{Tension de salida fondo de escala} = 3.2 \frac{\text{mV}}{\text{V}} * 10 \text{ V}$$

Esto quiere decir que cuando el desplazamiento es el máximo

$$d = \pm 100 \text{ mm}$$

$$\text{Tension de salida fondo de escala} = 32 \text{ mV}$$

Por ultimo para el caso de la calibración de la celda de carga se tiene:

$$\text{Sensibilidad Especifica} = 3 \text{ mV/V}$$

$$\text{Tension de Calibracion} = 15 \text{ V}$$

Entonces:

$$3 \text{ mV/V} = \frac{\text{Tension de salida fondo de escala}}{15 \text{ V}}$$

$$\text{Tension de salida fondo de escala} = 3 \frac{\text{mV}}{\text{V}} * 15 \text{ V}$$

Esto quiere decir que cuando la celda está a su máxima carga.

$$F = 10 \text{ Tn}$$

$$\text{Tension de salida fondo de escala} = 45 \text{ mV}$$

### Cálculo de error cuadrático medio (LVDT's)

**Tabla 20**

Muestras de datos de desplazamiento lineal

| Referencia<br>(mm) | LVDT RDP<br>ACT2000C<br>(1A) (mm) | LVDT RDP<br>ACT2000C<br>(1B) (mm) | LVDT RDP<br>ACT4000C<br>(2A) (mm) |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1                  | 4,99                              | 5,04                              | 4,92                              |
| 2                  | 5,01                              | 5,01                              | 4,97                              |
| 3                  | 5,00                              | 5,02                              | 4,95                              |
| 4                  | 5,03                              | 5,09                              | 4,94                              |
| 5                  | 5,02                              | 5,04                              | 4,94                              |
| 6                  | 5,04                              | 5,08                              | 4,94                              |
| $\bar{X}$          | 5,015                             | 5,046                             | 4,943                             |

Tomando seis muestra por sensor calcularemos el error cuadrático medio para determinar la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero, utilizando la siguiente formula.

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x)^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

Por lo tanto los valores obtenidos para cada uno de los sensores son los siguientes:

Para el sensor LVDT RDP ACT2000C (1A): 5.015±0.01

Para el sensor LVDT RDP ACT2000C (1B): 5.046±0.01

Para el sensor LVDT RDP ACT4000C (2A): 4,943±0.01

#### 4.4.1.3. Calibración de celda de carga

Para realizar este proceso se recurrió a un equipo que haya tenido la certificación de calibración por el laboratorio de mecánica de mariales para de esta forma reducir al máximo el margen de error permisible.



Figura 59 Maquina de ensayos universales (AMSLER FM-1033)

El equipo mostrado a continuación es el que ayudara con la comparación de datos entre la celda de carga a calibrar y la maquina certificada dictando los siguientes datos:

**Tabla 21**  
Calibración de celda de carga

**Calibración celda de carga RDP**

| <b>Valor carga certificada</b> | <b>Valor carga certificada</b> | <b>Error absoluto</b> | <b>Error relativo</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| [Kg]                           | [Kg]                           | %                     | %                     |
| 0                              | 0                              | 0                     | 0,00                  |
| 500                            | 494                            | 6                     | 1,20                  |
| 1000                           | 998                            | 2                     | 0,20                  |
| 1500                           | 1516                           | 16                    | 1,07                  |
| 2000                           | 2003                           | 3                     | 0,15                  |
| 2500                           | 2493                           | 7                     | 0,28                  |
| 3000                           | 3005                           | 5                     | 0,17                  |
| 3500                           | 3518                           | 18                    | 0,51                  |
| 4000                           | 4016                           | 16                    | 0,40                  |
| 4500                           | 4533                           | 33                    | 0,73                  |
| 5000                           | 5036                           | 36                    | 0,72                  |
| 5500                           | 5513                           | 13                    | 0,24                  |
| 6000                           | 6032                           | 32                    | 0,53                  |
| 6500                           | 6537                           | 37                    | 0,57                  |
| 7000                           | 7055                           | 55                    | 0,79                  |
| 7500                           | 7565                           | 65                    | 0,87                  |
| 8000                           | 8068                           | 68                    | 0,85                  |

Se han tomado valores de hasta 8000 kg, debido a que la bomba hidráulica tiene la capacidad de entregar máximo 8.424 kg  $\approx$  8.424 Tn, pese a que la celda soporta una carga máxima de 10000 kg.

El valor del error absoluto viene dado por:

$$error\ abs = valor\ real - valor\ medido$$

Y el error relativo:

$$error\ rel = \frac{(valor\ medido - valor\ real)}{valor\ real} * 100\%$$

Siendo este último el más significativo, concluyendo así que el error máximo presentado es:

$$error\ rel = 1.2\ \%$$

#### 4.4.1.4. Factor de escala

Es una relación matemática existente entre las dimensiones reales y los valores de una gráfica de la realidad, este es utilizado para ampliar o reducir para mejorar el entendimiento del análisis.

Este valor será calculado con el fin de amplificar la señal obtenida del Datalogger RDP para ser procesados en el programa de Matlab según sea necesario.

Su cálculo es obtenido por:

$$Scaling\ factor = \frac{full\ scale\ value\ (engeneering\ units)}{|full\ scale\ value\ (volts)|}$$

Donde:

*full scale value (engeneering units)*: Rango máximo de trabajo, según sea la unidad de medida, esto puede ser desplazamiento mm, fuerza Tn, Presión Pa.

*full scale value (volts)*: Voltaje máximo de salida del Datalogger, según el sensor conectado.

#### 4.4.1.4.1. Cálculo del factor de escala LVDT'S ACT2000C

Datos:

*full scale value (engineering units)*= 100 mm obtenido de la tabla 18

*full scale value (volts)*= -10.025 a +10.025

Por lo tanto:

$$\text{Scaling factor} = \frac{100 \text{ mm}}{|10.025 * 2|}$$

$$\text{Scaling factor} = 4.987$$

#### 4.4.1.4.2. Cálculo del factor de escala LVDT'S ACT4000C

Datos:

*full scale value (engineering units)*= 200 mm obtenido de la tabla 17

*full scale value (volts)*= -10.025 a +10.025

Por lo tanto:

$$\text{Scaling factor} = \frac{200 \text{ mm}}{|10.025 * 2|}$$

$$\text{Scaling factor} = 9.975$$



#### 4.4.1.4.3. Cálculo del factor de escala de la Celda de carga RDP

Datos:

*full scale value (engineering units)* = 8.424 Tn

*full scale value (volts)* = +10.025

Por lo tanto:

$$\text{Scaling factor} = \frac{8.424 \text{ Tn}}{|10.025|}$$

$$\text{Scaling factor} = 0.840$$

#### 4.4.1.5. Aplicación del Factor de escala en software de Matlab

Los valores antes calculados serán adoptados en la aplicación Matlab mediante una programación .m, de la siguiente manera.

```
#nn SET CHANNEL,Address,Enable,TareFacility,Scaling,Offset,TarePoint,Format
```

Figura 60 Código de seteo para canal de entrada de datos

Este comando establece los valores de registro para el canal especificado. Al menos uno debe especificarse para que el registro funcione.

Donde:

*Address*: es la dirección de configuración del canal. El formato es abbc donde a es el número del rack, bb es la dirección del módulo y c es el canal A o B.

*Enable*: Activar / desactivar el canal. Si es ON un canal será registrado, si es OFF el canal será ignorado.

*Tarefacility:* esto habilita / inhabilita la tarea. Si es ON el canal responderá los comandos CERO y CLR ZERO, si OFF estos comandos serán ignorados por este canal.

*Scaling:* número que representa el multiplicador de escala.

*Offset:* Número que representa el desplazamiento requerido. El desplazamiento se agrega al valor escalado.

*TarePoint:* Número asumido cuando el canal se pone a cero, cuando se pone a cero.

*Format:* (dos dígitos que representan la longitud de los datos). El formato decimal de datos registrados. El primer dígito es el número máximo de dígitos antes del decimal, el segundo es el número de dígitos después del decimal.

De tal forma que la configuración de los canales para nuestros sensores LVDT'S Y Celda de carga en la programación de Matlab queda de la siguiente forma:

```
fprintf(PS, '#00 SET CHANNEL,001A,ON,ON,4.977,0,0,23');
pause(.1);
fprintf(PS, '#00 SET CHANNEL,001B,ON,ON,4.97302,0,0,23');
pause(.1);
fprintf(PS, '#00 SET CHANNEL,002A,ON,ON,9.99,0,0,33');
pause(.1);
fprintf(PS, '#00 SET CHANNEL,003A,ON,ON,0.84,0,0,23');
pause(.1);
```

Figura 61 Seteo de canales de entrada

#### 4.4.2. Diseño del Software HMI

La interface HMI fue creada con el entorno de desarrollo GUIDE de Matlab. Esta herramienta nos permite crear interfaces de usuarios personalizables según las necesidades requeridas por el usuario, haciendo que la tarea de

diseñar una interface sea sencilla e intuitiva. Una de las principales ventajas que se obtiene al diseñar una HMI con este software es la compatibilidad con otras herramientas de Matlab como lo es el Simulink, Signal Processing Toolbox, PLC Coder, OPC Toolbox, entre otras.

La tarea principal que tiene nuestra HMI es que el usuario pueda visualizar los datos de la práctica, genere las gráficas que defina al fenómeno estudiado y que pueda manejar remotamente el vibróforo. Para que el software pueda ejecutar estas operaciones fue necesario utilizar la comunicación serial con la interface RS232 para la conexión con el datalogger y la comunicación Ethernet TCP/IP para la comunicación con el PLC.

#### 4.4.2.1. Comunicación serial RS232

##### 4.4.2.1.1. Configuración de la comunicación serial del HMI

Para establecer una comunicación Serial entre la interface HMI y el datalogger es necesario ejecutar un conjunto de comandos que definan ciertos parámetros, como la velocidad de transmisión de datos, el tiempo de espera, el número de bits a enviar y recibir, etc.

En la figura 62 se puede ver el código que se ejecuta al presionar el botón Conectar de la HMI (Ver Figura 63).

```
PS=serial('COM2');
set(PS,'Baudrate',9600);
set(PS,'StopBits',1);
set(PS,'DataBits',8);
set(PS,'Parity','none');
set(PS,'Terminator','CR/LF');
set(PS,'OutputBufferSize',128);
set(PS,'InputBufferSize',128);
set(PS,'Timeout',5);
fopen(PS);
```

Figura 62 Parámetros para comunicación serial en Matlab

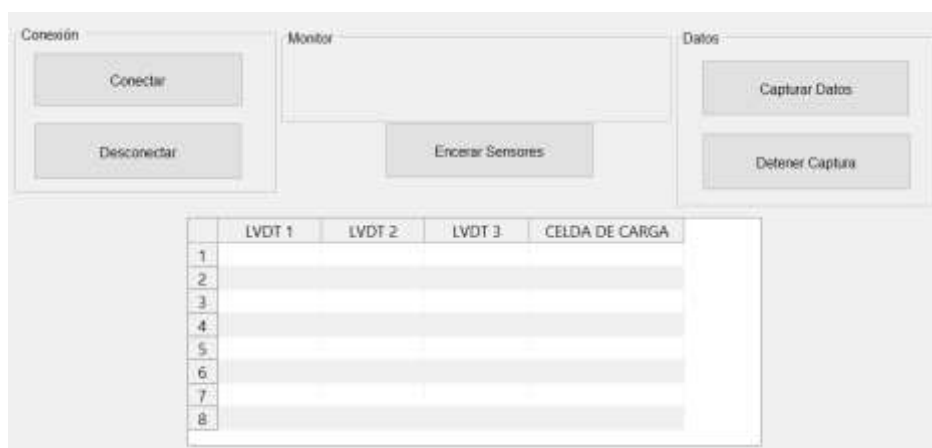


Figura 63 Interfaz HMI de comunicacion

En la primera línea establecemos a la variable PS como una comunicación de tipo serial utilizando el puerto de comunicación 2 (COM2). Posteriormente configuramos los siguientes parámetros complementarios:

**Baudrate:** También conocida como la velocidad de transferencia de datos serial. Es la velocidad a la cual se transmite los datos desde el computador hasta el datalogger y viceversa. Para nuestro caso configuramos una velocidad estándar de 9600 baud.

**StopBits:** Igualmente llamado Bits de parada y es utilizado para indicar el final de un byte en una transmisión asincrónica.

**DataBits:** Es el número de bits de datos que se transmitirán a través de la interface de comunicación. El valor seleccionado fue 8 bits ya que coincide con el tamaño de una palabra o byte, y es la más común y utilizada en diferentes aplicaciones.

**Parity:** Es la forma como se comprueba errores en la transmisión de los datos. Para nuestro caso se estableció en ninguna.

**Terminator:** La combinación de códigos CR/LF se usa para representar la creación de una nueva línea.

*OutputBufferSize*: Es el tamaño en bytes del búfer de salida durante el proceso de escritura. El tamaño de búfer de salida en nuestro programa es de 128 bytes.

*InputBufferSize*: Es el tamaño en bytes del búfer de entrada durante el proceso de escritura. En nuestro programa el tamaño de búfer de entrada es de 128 bytes.

*Timeout*: El tiempo de espera es el máximo tiempo que se espera en la comunicación para realizar una acción de escritura o lectura. Si se supera este tiempo la operación se interrumpe. Nuestro tiempo de espera fue configurado en 5 segundos.

#### 4.4.2.1.2. Configuración de la comunicación serial del Datalogger

La configuración de la comunicación del datalogger se lo puede hacer tanto por software, con algunas líneas de código antes de establecer la comunicación, o físicamente aplastando una combinación de botones preestablecidos.

Para nuestro caso hemos utilizado el método físico estableciendo los parámetros que vienen por defecto en el equipo. Para resetear el equipo y establecer esta configuración basta con mantener presionado los botones flecha arriba ▲ y flecha abajo ▼ mientras se enciende el equipo (Ver figura 64)



Figura 64 Reseteo de configuracion

Con estos pasos se logra configurar los siguientes parámetros: Address=00, Communications mode = RS232, Baud rate = 9600 y Hand-Shaking = ON.

El parámetro Address corresponde al espacio físico donde se conectó el módulo de comunicación. Este dato solo es necesario modificarlo cuando existen más módulos de comunicación conectados.

El modo de comunicación (Communications mode) establece el protocolo de comunicación a utilizar. Los valores aceptables son 232, 422 y 485, que corresponde a las diferentes interfaces de comunicación serial.

La velocidad de intercambio de datos por defecto es de 9600 bauds.

El Hand-Shaking es un método para responder a problemas como la sobrecarga de datos en el receptor. Establecerlo en ON hace que la comunicación tenga menos errores y no se genere una interrupción de la conexión.

Igualmente, mediante software se puede configurar estos mismos parámetros utilizando el comando:

```
#00 SET COMMS,00,232,9600,ON
```

Figura 65 Código para comunicación serial RS232

#### **4.4.2.2. Comunicación Ethernet TCP/IP**

La comunicación Ethernet es utilizada en el programa para realizar en la interface de usuario las operaciones que se podría ejecutar manualmente estando frente al equipo. Es decir, el Vibróforo de baja frecuencia puede ser

usado manualmente mediante el tablero de maniobra o de forma remota utilizando el software HMI.

Para llevar a cabo esta comunicación entre el PLC S7-1200 y Matlab-Simulink nos apoyamos en los protocolos TCP/IP.

En Matlab se creó una S-Function <<client.c>> que es un bloque de Simulink asociado a una programación en lenguaje C (client.c) que utiliza la biblioteca de funciones Winsock (WINdowsSOCKET). Esta última biblioteca contiene el soporte para envío y recepción de datos mediante el protocolo TCP/IP sobre la plataforma Windows.

En el PLC S7-1200 se utilizaron las instrucciones de comunicación abierta TSEND\_C y TRCV\_C disponibles en las librerías de comunicación del software TIA Portal.

En la figura 66 se muestra una representación esquemática de la comunicación entre Matlab y el PLC.

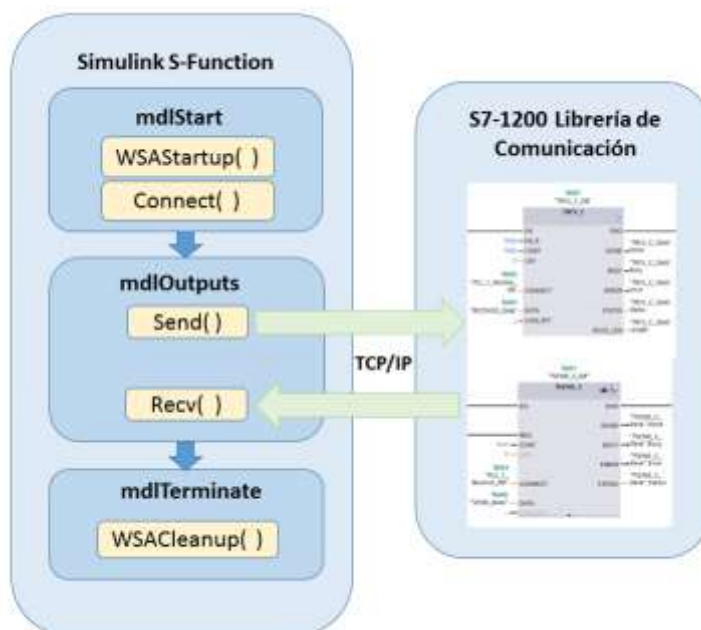


Figura 66 Esquema de comunicación entre Matlab y PLC S7-1200

#### 4.4.2.2.1. Configuración del protocolo TCP/IP del PLC S7-1200

##### Bloque de función TRCV\_C

- a. Abrir el software TIA Portal y crear un nuevo proyecto.
- b. En la ventana de configuración de dispositivos buscar el CPU S7-1200 y agregarlo.
- c. En el árbol del proyecto dar clic derecho sobre Configuración de dispositivo y seleccionar Propiedades. En la pestaña General dar clic sobre la viñeta Interface PROFINET y luego sobre Direcciones Ethernet. Colocar una dirección IP válida al igual que la máscara subred.
- d. En el árbol del proyecto ir hacia el bloque de programas e ingresar al bloque principal (Main [OB1])
- e. En las Instrucciones ir a biblioteca de comunicación y buscar el bloque TRCV\_C, seleccionarlo y arrastrarlo hacia la ventana principal. De clic derecho sobre el bloque y seleccione Propiedades, y después Parámetros de la Conexión. En la pestaña de Interlocutor seleccionar la opción Sin especificar. Para la dirección local escribir la dirección IP asignada al PLC y la dirección del Interlocutor la dirección IP que llevará la PC.
- f. Finalmente marcar la casilla de Establecimiento activo de la conexión en el lado del Interlocutor. En la figura 67 se muestra como debe quedar la configuración correcta del bloque de comunicación.



**General**

| Local   | Interlocutor   |
|---|--|
| Punto final: PLC_1  | Sin especificar  |
| Interfaz: PLC_1, Interfaz PROFINET_1 [X1 : PN(LAN)]         |  |
| Subred: 192.168.0.2   | 192.168.0.1  |
| Dirección: 192.168.0.2                                      | 192.168.0.1  |
| Tipo de conexión: TCP                                       |  |
| ID de conexión (dec): 1                                     |  |
| Datos de conexión: PLC_1_Receive_DB                         |  |
| <input type="radio"/> Establecimiento activo de la conexión | <input checked="" type="radio"/> Establecimiento activo de la conexión |

Figura 67 Configuración de comunicación de bloque TRCV\_C

- g. Para completar la configuración del bloque TRCV\_C es necesario crear dos bloques de datos: TRCV\_C\_Data y RECEIVED\_Data. Para crear el bloque TRCV\_C\_Data es necesario ir a la pestaña de Bloques de programa y dar clic sobre Agregar nuevo bloque; seguidamente seleccionar Bloque de datos. El nombre del bloque puede seleccionarse al gusto del usuario, pero en nuestro caso se ha escogido TRCV\_C\_Data. Para este nuevo bloque de datos debemos elegir DB Global y dar clic en Aceptar. Agregar los nombres de datos y tipo de datos igual a la figura 68 que se muestra en la parte inferior.

| TRCV_C_Data |        |               |                    |
|-------------|--------|---------------|--------------------|
|             | Nombre | Tipo de datos | Valor de arranq... |
| 1           | Static |               |                    |
| 2           | Good   | Bool          | false              |
| 3           | Done   | Bool          | false              |
| 4           | Busy   | Bool          | false              |
| 5           | Error  | Bool          | false              |
| 6           | Status | Word          | 16#0               |
| 7           | Length | UInt          | 0                  |

Figura 68 Nombres de datos del bloque TRCV\_C\_Data

- h. El segundo bloque de datos se nombró RECEIVED\_Data que será utilizado para almacenar los valores de los datos obtenidos en la

comunicación. Desde la pestaña Bloques de programa, elija Agregar nuevo bloque, luego elija Bloque de datos, escriba un nombre y elija Received\_data\_type tal como se muestra en la figura 69.

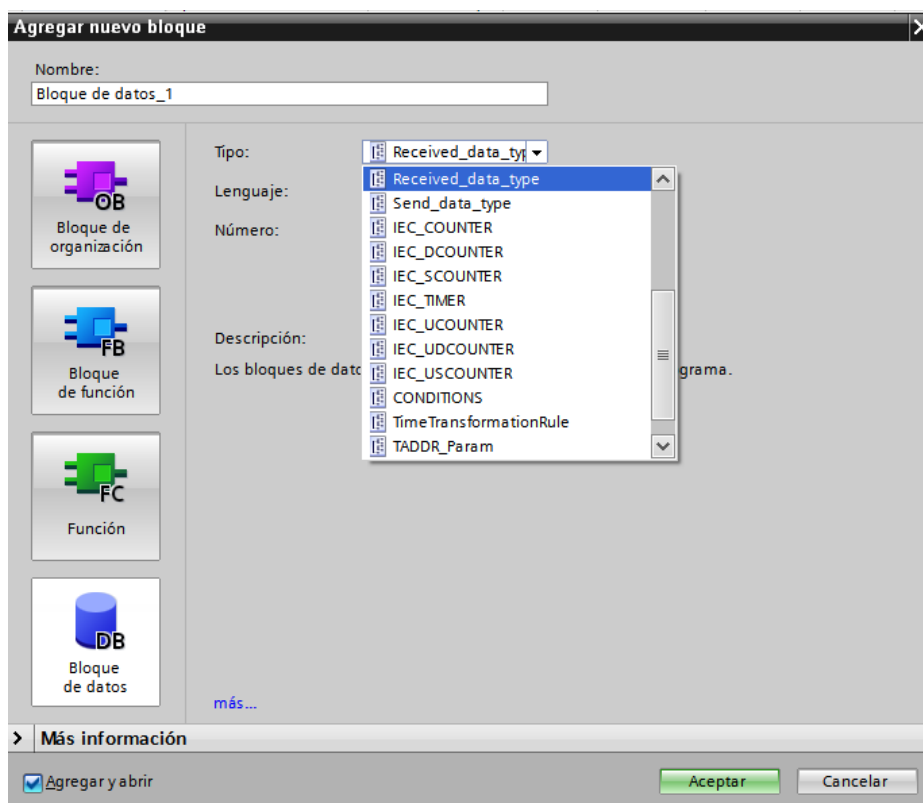


Figura 69 Bloque de datos

- i. Dentro del bloque RECEIVED\_Data definimos el tipo datos recibidos. Para nuestro caso el PLC S7 1200 posee entradas analógicas y digitales que serán definidas como tipo Real y tipo Byte respectivamente. En la figura 70 se puede observar dicha configuración.

| RECEIVED_Data |          |                     |                    |                          |
|---------------|----------|---------------------|--------------------|--------------------------|
|               | Nombre   | Tipo de datos       | Valor de arranq... | Remanen...               |
| 1             | Static   |                     |                    | <input type="checkbox"/> |
| 2             | table_AI | Array[0..7] of Real |                    | <input type="checkbox"/> |
| 3             | table_DI | Array[0..7] of Byte |                    | <input type="checkbox"/> |

Figura 70 Definición del tipo de datos del bloque RECEIVED\_Data

- j. Finalmente complete los espacios del bloque tal como se indica en la figura 71.

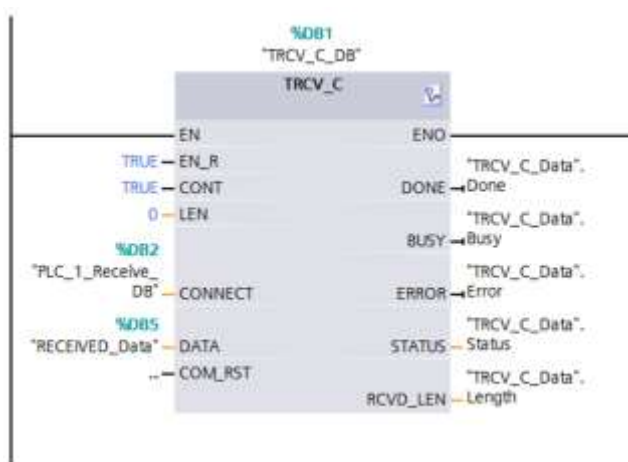


Figura 71 Bloque de datos TRCV\_C

### Bloque de función TSEND\_C

- a. La configuración del bloque TSEND\_C es muy similar a la del bloque TRCV\_C, por lo cual iniciamos del mismo modo, buscando y arrastrando el bloque a la ventana principal. Una vez ya en el bloque principal damos clic derecho sobre el Bloque TSEND\_C y nos dirigimos a Propiedades y escribimos los parámetros tal como se muestra en la figura 72.

General

Local

Punto final: PLC\_1

Interfaz: PLC\_1, Interfaz PROFINET\_1[X1 : PN(LAN)]

Subred: [ ]

Dirección: 192.168.0.2

Tipo de conexión: TCP

ID de conexión (dec): 1

Datos de conexión: PLC\_1\_Receive\_DB

Interlocutor: Sin especificar

192.168.0.1

Establecimiento activo de la conexión  Establecimiento activo de la conexión

Figura 72 Configuración de comunicación de bloque TSEND\_C

- b. Seguidamente se crea un bloque de datos TSEND\_C\_Data. Los nombres y el tipo de datos se indica en la Figura 73.

| TSEND_C_Data |        |               |                    |
|--------------|--------|---------------|--------------------|
|              | Nombre | Tipo de datos | Valor de arranq... |
| 1            | Static |               |                    |
| 2            | Done   | Bool          | false              |
| 3            | Busy   | Bool          | false              |
| 4            | Error  | Bool          | false              |
| 5            | Status | Word          | 16#0               |

Figura 73 Nombres de datos del bloque TSEND\_C\_Data

- c. El siguiente paso es declarar el bloque de datos SEND\_Data, y definir tipo de dato que se enviaran por las salidas del PLC. En la figura 74 se muestra cómo deben ser declarados estos datos.

| SEND_Data |          |                     |                    |
|-----------|----------|---------------------|--------------------|
|           | Nombre   | Tipo de datos       | Valor de arranq... |
| 1         | Static   |                     |                    |
| 2         | table_AO | Array[0..7] of Real |                    |
| 3         | table_DO | Array[0..7] of Byte |                    |

Figura 74 Definición del tipo de datos del bloque SEND\_Data

- d. Para que los datos sean enviados el bloque TSEND\_C necesita una señal de confirmación de flanco positivo. Una forma de hacer esto es con la ayuda de un Timer, haciendo que se refresque cada cierto tiempo. La señal del Timer es enviada al campo REQ del bloque TSEND\_C permitiendo que envíe datos cada 100 [ms]. En la figura 75 se puede ver la configuración del Timer.

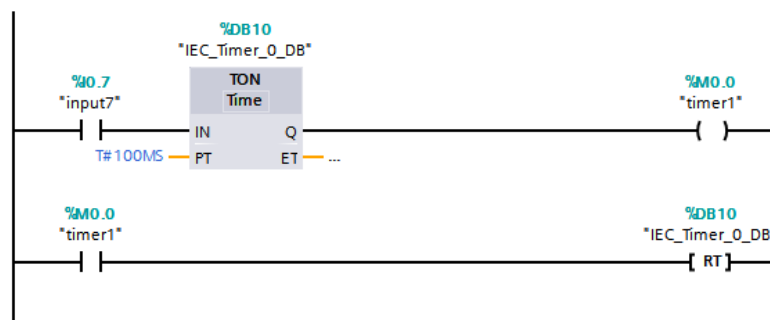


Figura 75 Configuración de Timer

- e. Finalmente se completa los campos del bloque como se muestra en la figura 76.

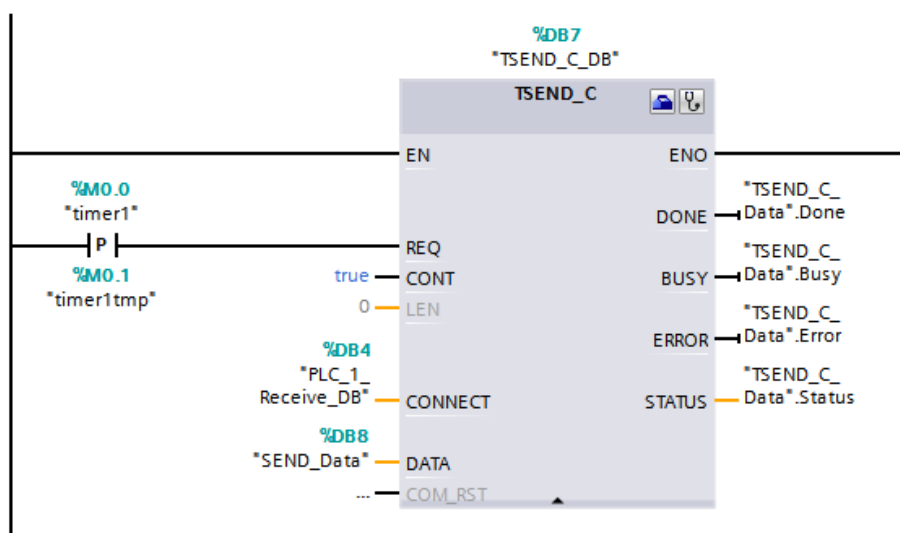


Figura 76 Bloque de datos TSEND\_C

#### 4.4.2.2.2. Configuración del protocolo TCP/IP en Simulink

##### Configuración de la comunicación

En el bloque del PLC de Simulink damos doble clic para abrir los parámetros de la S-Function. En la casilla IP escribimos entre apostrofes la dirección IP del PLC S7-1200. Esta dirección IP debe ser la misma que se escribió durante la configuración del PLC. En la pestaña de protocolo seleccionamos TCP. Finalmente seleccionamos el orden de Bytes en la memoria del PLC. Para nuestro caso la selección será Big Endian. En la figura 72 se ejemplifica la configuración realizada.

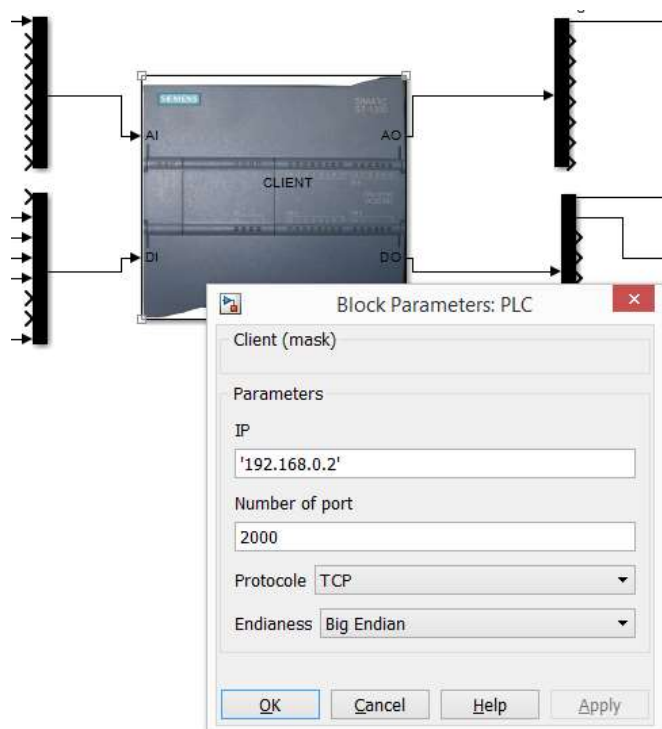


Figura 77 Configuración de parámetros de comunicación

Es importante saber que los datos de ingreso en el bloque de PLC de Simulink deben ser boolean para las entradas digitales y double para las entradas de señales analógicas. En la Figura 78 se muestra la configuración de los atributos de dichas señales.

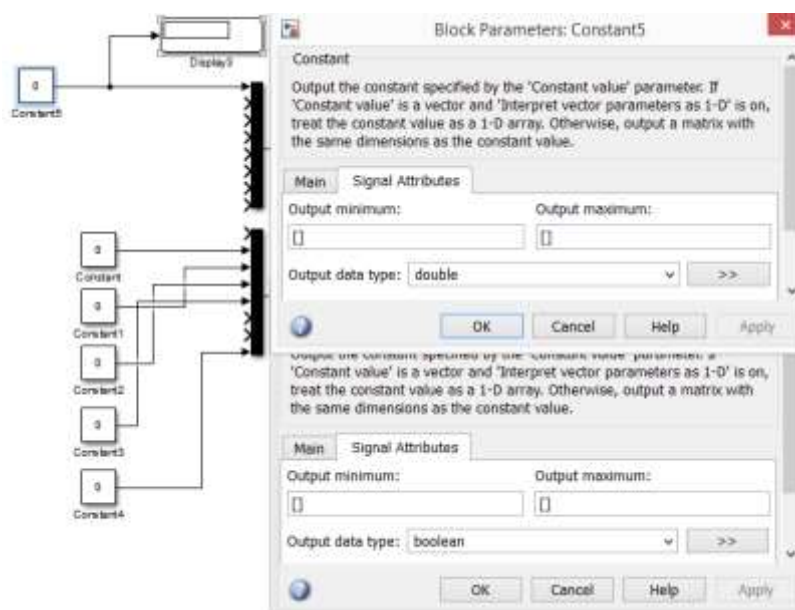


Figura 78 Configuración del tipo de datos de entrada

#### 4.4.2.3 Ventanas del HMI

Al ejecutar el programa se abre la ventana de inicio de sesión. En esta ventana se puede ingresar el usuario como Docente o como Alumno, con la única diferencia que el docente podrá tener acceso a la ventana de Configuración para cambiar algunos parámetros. (Ver figura 79)



The image shows a software window titled "LOGIN". At the top center is the text "LOGIN". Below this is the logo of the Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), which includes a crest and the text "ESPE" in large green letters, followed by "UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS" and "INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA" in smaller black letters. Below the logo, there are two text input fields. The first is labeled "Usuario:" and the second is labeled "Contraseña:". Below the password field is a button labeled "Ingresar". The window has standard Windows-style window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

Figura 79 Ventana de inicio de sesion

Después de ingresar el usuario y contraseña se abrirá la venta del HMI. Aquí el usuario pude realizar las acciones de operación de la máquina, como accionarla para que arranque, ponerla en stop, activar el paro de emergencia, activar o desactivar la válvula de alivio, incrementar o disminuir el porcentaje de carga, o ingresar el valor de carga en Toneladas que se desea aplicar sobre algún objeto.



Figura 80 Ventana de interfaz Humano-Maquina

Además, esta ventana posee una perilla de selección de modo que bloquea el equipo de acuerdo al modo seleccionado. Por ejemplo, si la ventana indica modo Manual (Ver figura 81) los botones de la HMI se deshabilitan imposibilitando la acción de presionarlos. En el otro caso, al seleccionar el modo Remoto los botones del HMI se mantiene habilitados como en la figura 80, pero los botones físicos del tablero de maniobra se deshabilitan. El único botón que puede ser accionado sin importar el modo seleccionado es del botón de Emergencia debido a su gran importancia en el caso de algún incidente que pueda ocurrir.





Figura 81 Venta de mando por control manual

Al presionar el botón “Ir a conexión” aparecerá una nueva ventana. Esta ventana tiene la función de realizar la conexión del HMI con el datalogger con la finalidad de poder observar los datos de los diferentes sensores. Esta ventana se encuentra dividida en secciones; la sección superior sirve para poder testear y realizar ensayos sobre materiales aplicando un valor de carga deseado y observando la deformación producida por esta en la sección Monitor del HMI. La sección inferior está íntimamente realizada con la práctica de flexión de vigas, haciendo que el equipo funcione automáticamente solo ingresando el valor máximo de carga a aplicar y el tiempo que desea que dure el ensayo.

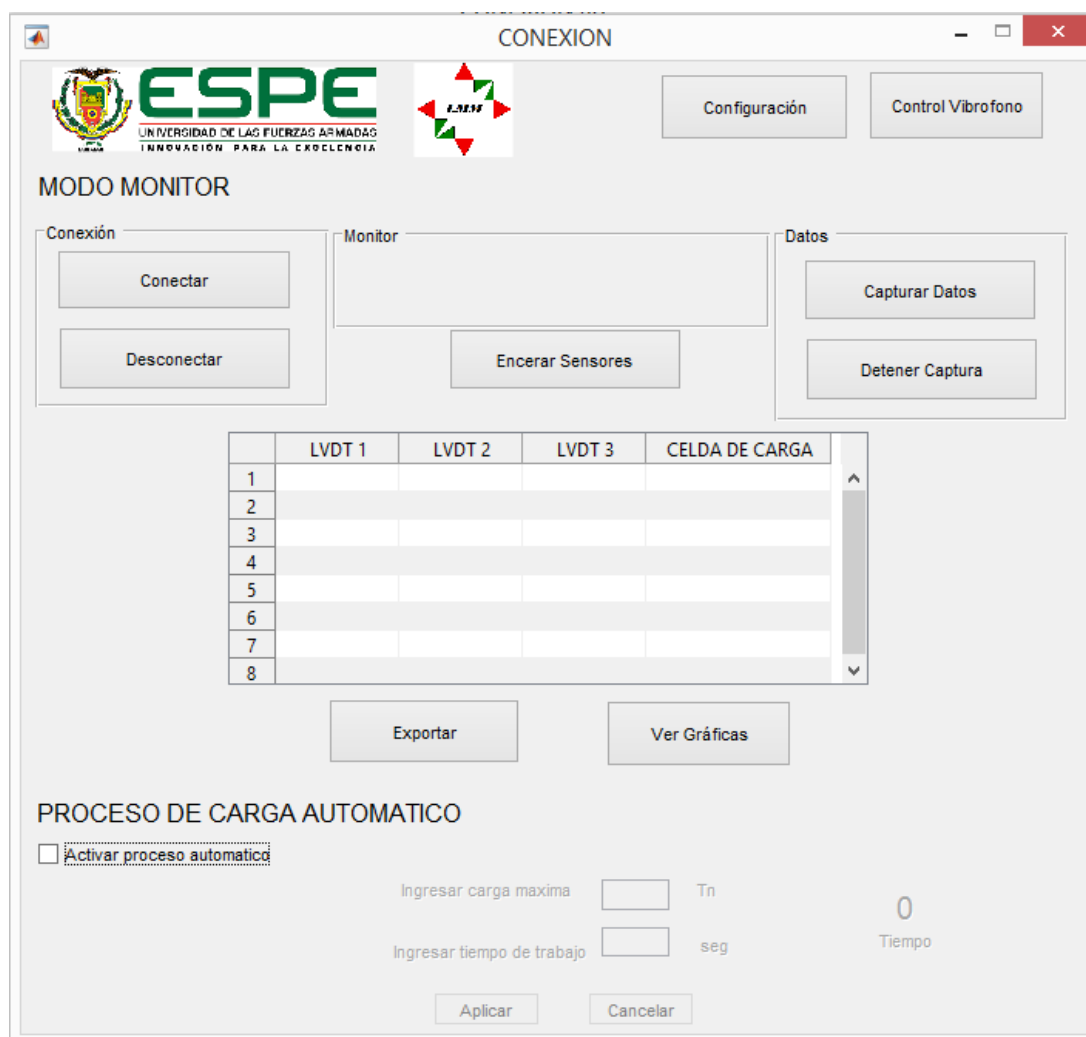


Figura 82 Venta de conexión PLC-Datalogger y visualizador de datos

Adicionalmente se puede guardar los valores obtenidos en la práctica en una hoja de Excel, utilizando el botón Exportar.

La ventana de configuración (Solo disponible para el usuario Docente) sirve para elegir las unidades en las que se desea presentar los valores de la carga. Las dos opciones disponibles son Kilogramos fuerza y Toneladas como se indica en la figura 83.



Figura 83 Ventana de configuración de parámetros

La ventana de Graficas muestra los diagramas de deformación vs tiempo y Fuerza vs deformación para cada uno de los LVDT's. Estas graficas pueden ser guardadas en cualquier ubicación que el usuario desee pulsando el botón Guardar.

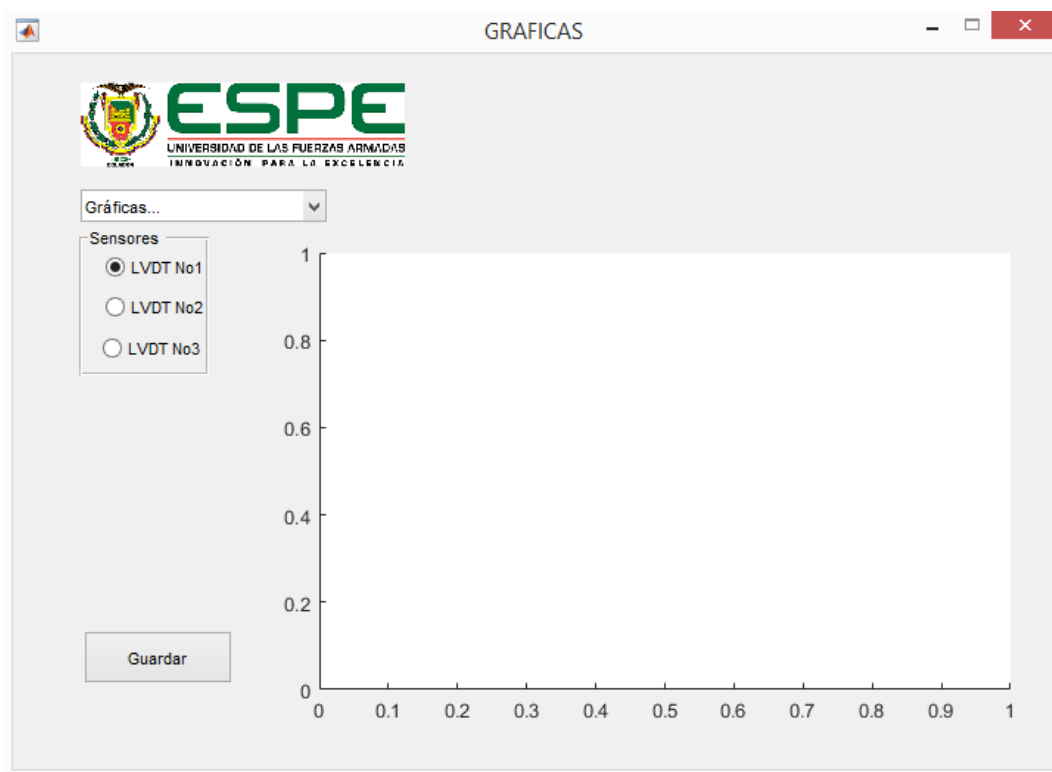


Figura 84 Venta de graficas Fuerza VS Deformación

## CAPITULO V

### PRUEBAS, RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL EQUIPO

Las pruebas, resultados y validación del proyecto se han realizado en base a la aplicación para la cual está construida la máquina, por tal motivo en el presente capítulo se muestra un análisis de ensayos de flexión en vigas de diferente material, los valores obtenidos como conclusiones fueron extraídos mediante ensayos prácticos y teóricos de comprobación.

Para realizar una buena experimentación ha sido necesario realizar el ensayo en diferentes materiales como:

- Viga de pino
- Viga de dos materiales (Concreto-Acero)
- Viga de laurel
- Viga de Bambú

Cuyos resultados son producto de la aplicación de una carga puntual en la mitad de la viga que se encuentra simplemente apoyada sobre dos soportes equidistantes desde el punto de concentración de la carga.

#### 5.1. FLEXIÓN EN VIGA DE PINO

Este tipo de madera es semidura y de resistencia media sobre todo cuando se la utiliza en estructuras.

##### 5.1.1. Propiedades mecánicas del pino

- Módulo de elasticidad: 110000 kg/cm<sup>2</sup>
- Módulo de rotura: 793000 kg/cm<sup>2</sup>

### 5.1.2. Ensayo de flexión en viga de pino

Se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre

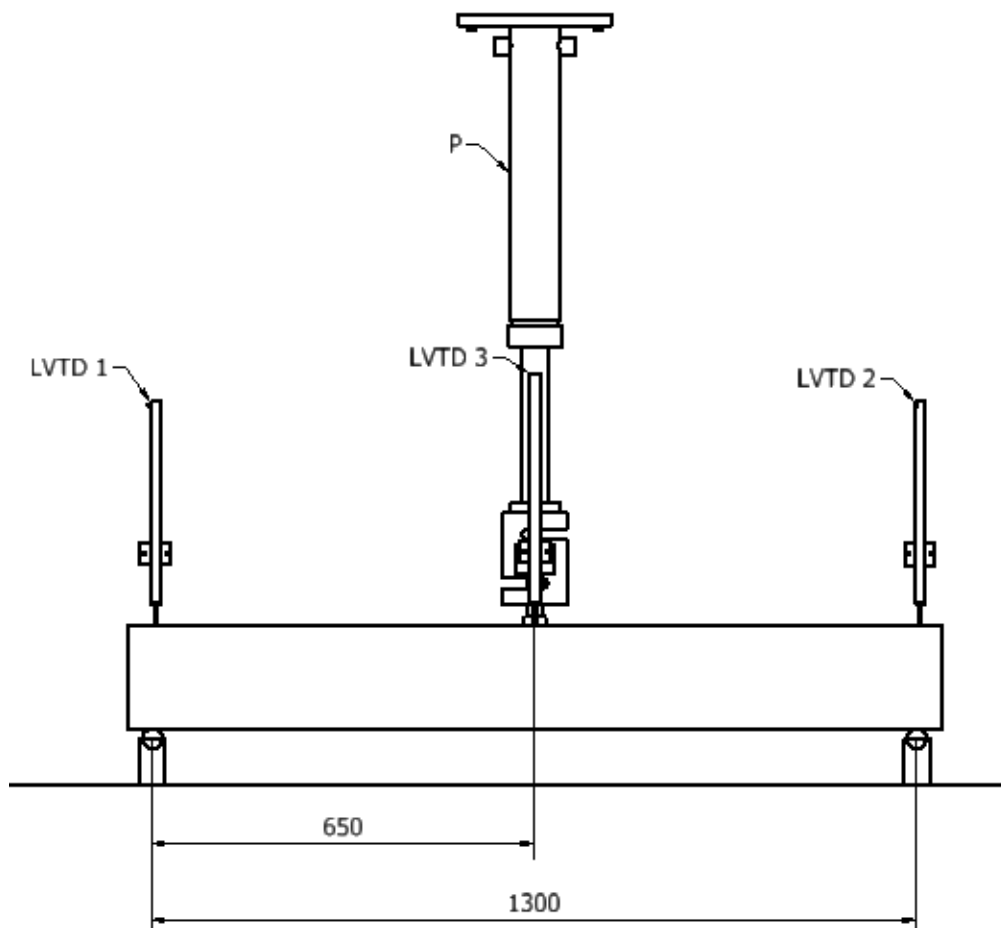


Figura 85 Ensayo de flexión en viga de pino (Unidades en milímetros)

Y la siguiente área transversal

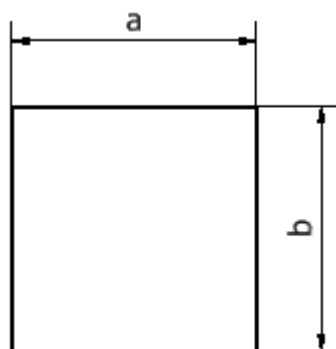


Figura 86 Área transversal (Pino)

Datos

$$a = 9 \text{ cm}$$

$$b = 9 \text{ cm}$$

$$L = 130 \text{ cm}$$

$$P = 958 \text{ kg}$$

$$E_{\text{pino}} = 110000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

#### 5.1.2.1. Momento de inercia

$$I = \left( \frac{b \cdot h^3}{12} + A_{\text{trans}} \cdot Y^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{a \cdot b^3}{12} + (a \cdot b) \cdot (0)^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{(9 \text{ cm}) \cdot (9 \text{ cm})^3}{12} \right)$$

$$I = 546,75 \text{ cm}^4$$

#### 5.1.2.2. Calculo de la deflexión

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{\text{pino}} \cdot I}$$

$$\delta = \frac{(958 \text{ kg}) \cdot (130 \text{ cm})^3}{48 \cdot \left( 110000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \cdot (546,751 \text{ cm}^4)}$$

$$\delta = 0,727 \text{ cm}$$

$$\delta = 7,27 \text{ mm}$$

### 5.1.2.3. Cálculo de error

$$E_{\%} = \frac{V_{practico} - V_{real}}{V_{real}}$$

El valor real del desplazamiento es obtenido por medio del software diseñado mismo que muestra la siguiente gráfica.

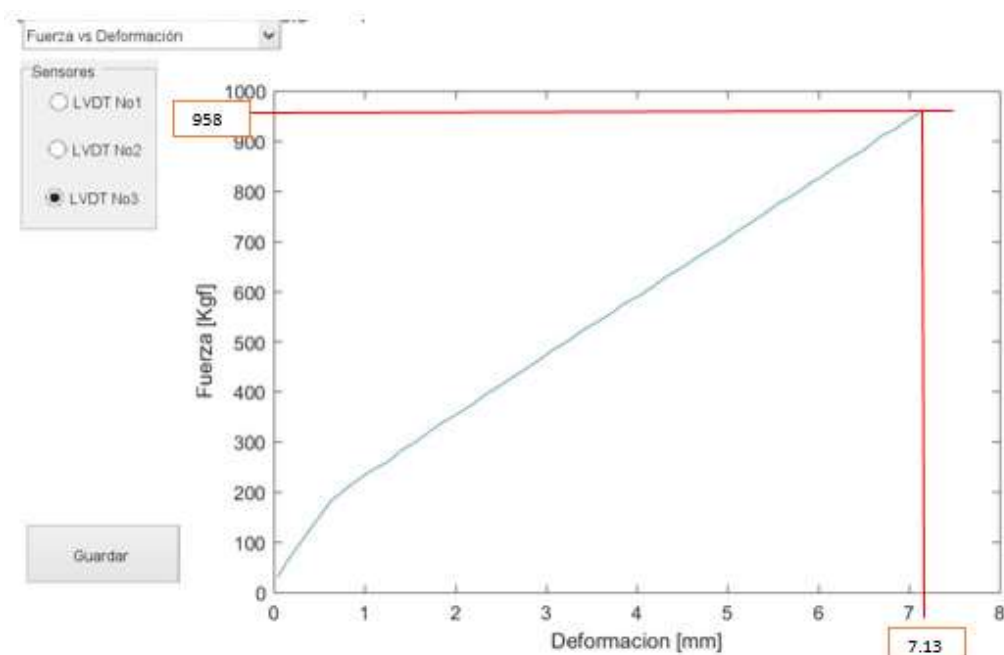


Figura 87 Gráfica de Fuerza Vs Deformación en viga de pino

Por lo tanto:

$$\delta_{real} = 7,13 \text{ mm}$$

Entonces:

$$E_{\%} = \frac{\delta_{practico} - \delta_{real}}{\delta_{real}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = \frac{7,27 \text{ mm} - 7,13 \text{ mm}}{7,13 \text{ mm}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = 1,96 \%$$

## 5.2. ENSAYO EN VIGA DOS MATERIALES

Para este ensayo se tuvo una viga mixta compuesta de hormigón y varilla, este tipo de combinación es indispensable cuando se trata de construcciones civiles de gran tamaño es decir cuando se habla de casas, edificios, puentes, túneles entre otros.

### 5.2.1. Propiedades mecánicas de los materiales

- Módulo de elasticidad del hormigón:  $3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de elasticidad del acero:  $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

### 5.2.2. Ensayo de flexión en vigas de dos materiales

Se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre:

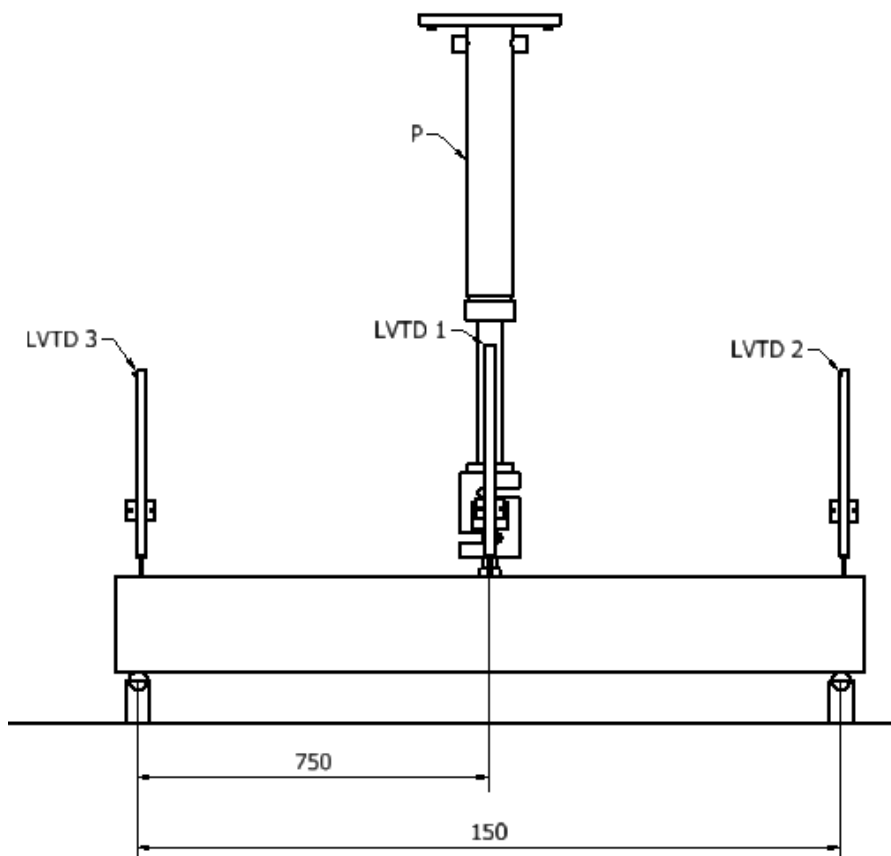


Figura 88 Grafica Esfuerzo Vs Deformación en viga de dos materiales



Con la siguiente área transversal:

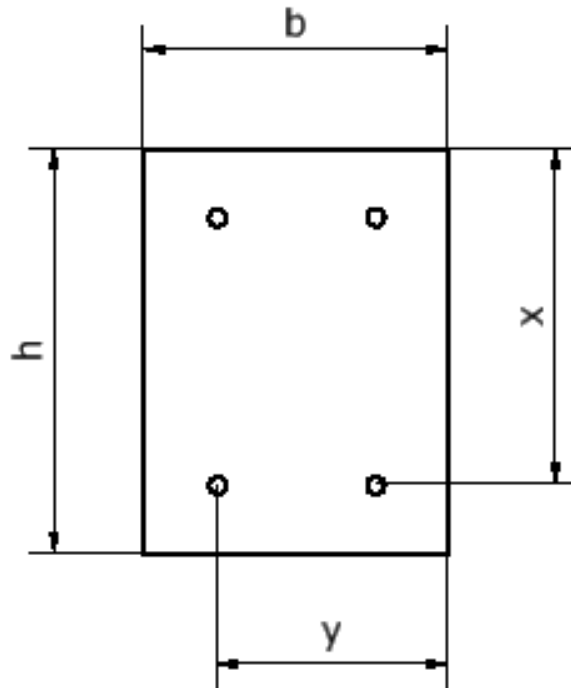


Figura 89 Área transversal de viga de dos materiales

Datos:

$$h = 20 \text{ cm}$$

$$b = 15 \text{ cm}$$

$$x = 16,6 \text{ cm}$$

$$y = 11,4 \text{ cm}$$

$$\phi_{\text{Varilla}} = 0,9 \text{ cm}$$

$$P = 1543 \text{ kg}$$

$$L = 150 \text{ cm}$$

$$E_{\text{Hormigon}} = 3 \times 10^5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{\text{Acero}} = 2 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### 5.2.2.1. Factor de relación de módulos de elasticidad

$$n = \frac{E_{Acero}}{E_{Hormigon}}$$

$$n = \frac{2 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}}{3 \times 10^5 \frac{kg}{cm^2}}$$

$$n = 6,667$$

### 5.2.2.2. Ancho del área equivalente de acero

$$b_1 = \frac{b}{n}$$

$$b_1 = \frac{15 \text{ cm}}{6,667}$$

$$b_1 = 2,25 \text{ cm}$$

### 5.2.2.3. Área transversal equivalente en acero

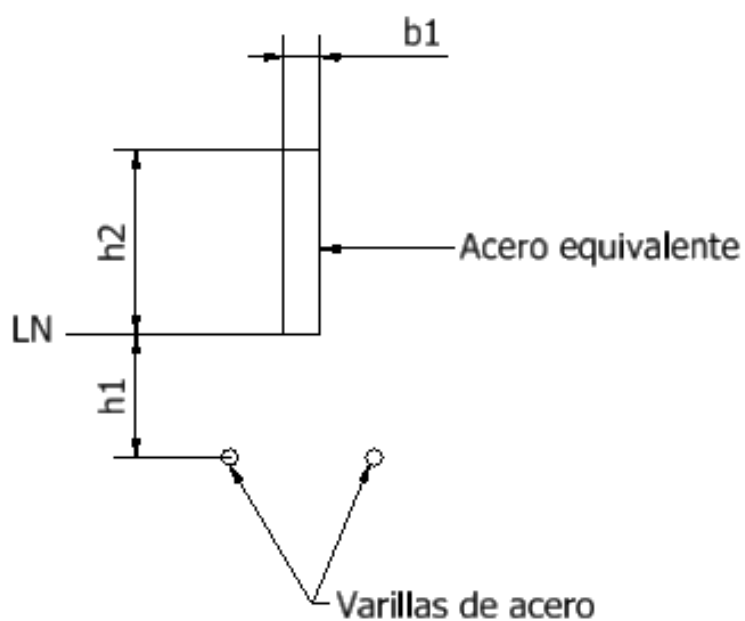


Figura 90 Área transversal equivalente en acero

### 5.2.2.4. Cálculo de alturas

Cálculo de  $h_1$  y  $h_2$  igualando los momentos estáticos sobre y bajo la línea neutra LN.

$$Q_{sup} = Q_{inf}$$

$$(A' \cdot Y')_{sup} = (A' \cdot Y')_{inf}$$

$$(b_1 \cdot h_2) \cdot \frac{h_2}{2} = \left( 2 \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{varilla}^2}{4} \right) \cdot h_1$$

Si:

$$h_1 + h_2 = 16,6 \text{ cm}$$

$$h_1 = 16,6 \text{ cm} - h_2$$

Entonces:

$$(2,25 \text{ cm}) \cdot \frac{h_2^2}{2} = \left( 2 \cdot \frac{\pi \cdot (0,9 \text{ cm})^2}{4} \right) \cdot (16,6 \text{ cm} - h_2)$$

$$1,125 \cdot (h_2)^2 = -1,2723 \cdot (h_2) + 21,12$$

$$1,125 \cdot (h_2)^2 + 1,2723 \cdot (h_2) - 21,12 = 0$$

Por lo tanto:

$$h_2 = 3,804 \text{ cm}$$

Y,

$$h_1 = 12,796 \text{ cm}$$

### 5.2.2.5. Cálculo del momento de inercia

$$I = \left( \frac{b_1 \cdot h_2^3}{12} + A_{sup} \cdot Y_{sup}^2 \right) + \left( \frac{\pi \cdot R^4}{4} + A_{inf} \cdot Y_{inf}^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{b_1 \cdot h_2^3}{12} + (b_1 \cdot h_2) \cdot \left( \frac{h_2}{2} \right)^2 \right) + \left( \frac{\pi \cdot R_{varilla}^4}{4} + (\pi \cdot R_{varilla}^2) \cdot Y_1^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{(2,25 \text{ cm}) \cdot (3,804 \text{ cm})^3}{12} + (2,25 \text{ cm}) \cdot (3,804 \text{ cm}) \cdot \left( \frac{3,804 \text{ cm}}{2} \right)^2 \right) + \left( \frac{\pi \cdot (0,45 \text{ cm})^4}{4} + (\pi \cdot (0,45 \text{ cm})^2) \cdot (12,796 \text{ cm})^2 \right)$$

$$I = 10,321 \text{ cm}^4 + 61,926 \text{ cm}^4 + 0,0322 \text{ cm}^4 + 104,165 \text{ cm}^4$$

$$I = 176,4442 \text{ cm}^4$$

### 5.2.2.6. Cálculo de la deflexión

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{Acero} \cdot I}$$

$$\delta = \frac{(1543 \text{ kg}) \cdot (150 \text{ cm})^3}{48 \cdot \left( 2 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \cdot (176,4442 \text{ cm}^4)}$$

$$\delta = 0,307 \text{ cm}$$

$$\delta = 3,07 \text{ mm}$$

### 5.2.2.7. Cálculo de error

$$E_{\%} = \frac{V_{practico} - V_{real}}{V_{real}}$$

El valor real del desplazamiento es obtenido por medio del software diseñado mismo que muestra la siguiente gráfica.

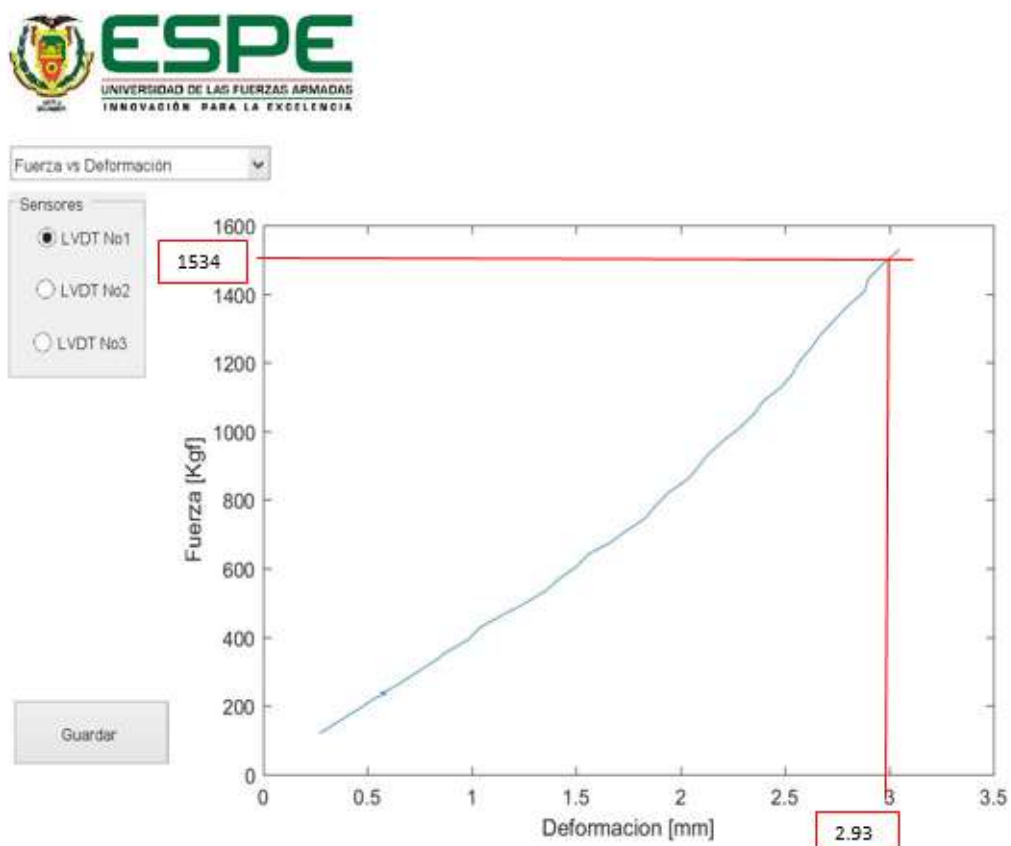


Figura 91 Grafica Fuerza Vs Deformación en viga de dos materiales

Por lo tanto:

$$\delta_{real} = 2,93 \text{ mm}$$

Entonces:

$$E_{\%} = \frac{\delta_{practico} - \delta_{real}}{\delta_{real}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = \frac{3,07 \text{ mm} - 2,93 \text{ mm}}{3,05 \text{ mm}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = 4.78 \%$$

### 5.3. FLEXIÓN EN VIGA DE LAUREL

Hoy en día el laurel es un material utilizado en las construcciones civiles de casas familiares dándole usos como: vigas columnas y elementos estructurales, este debido a sus buenas propiedades mecánicas.

#### 5.3.1. Propiedades mecánicas:

- Módulo de la elasticidad:  $9979 \text{ MPa} = 101757,5 \text{ kg/cm}^2$

#### 5.3.2. Ensayo de flexión en viga de pino

Se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre

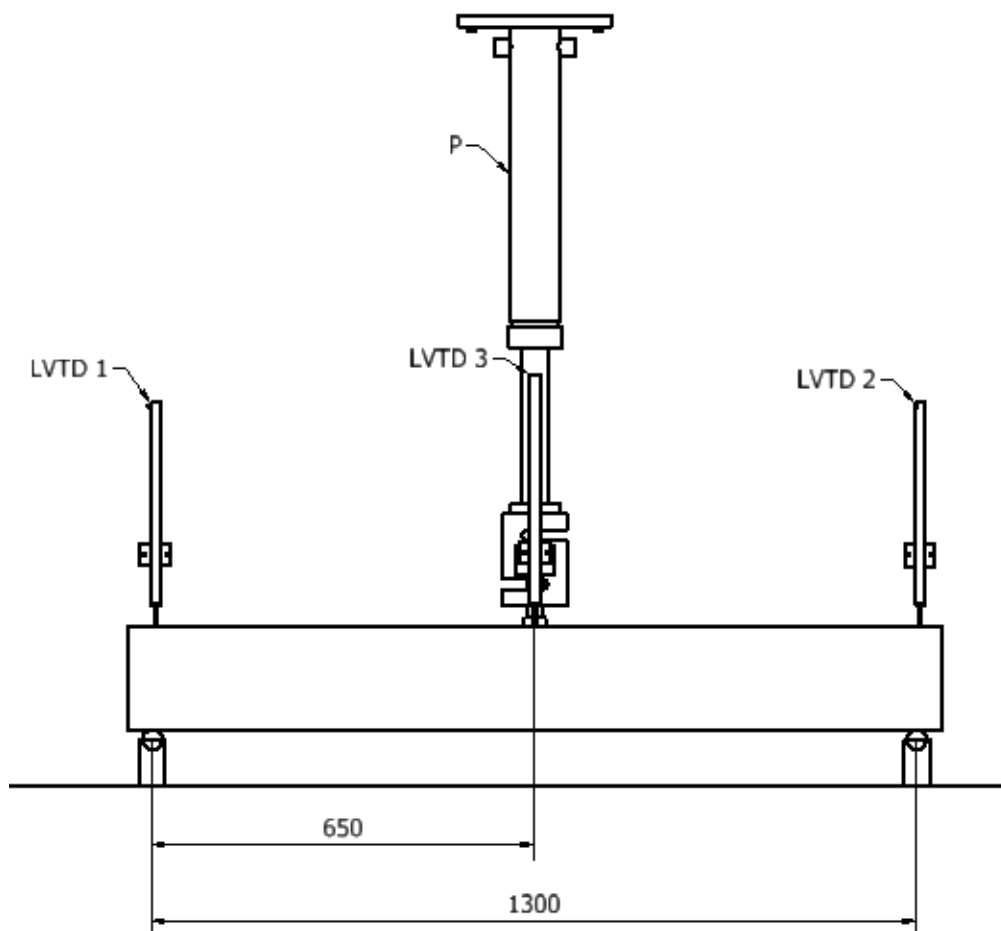


Figura 92 Ensayo de flexión en viga de pino (Unidades en milímetros)

Y la siguiente área transversal

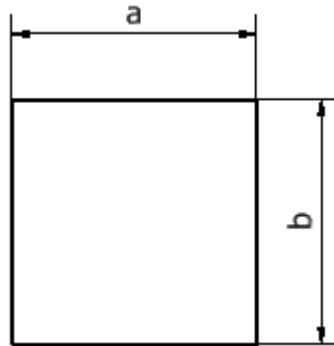


Figura 93 Área transversal (Pino)

Datos

$$a = 5 \text{ cm}$$

$$b = 8 \text{ cm}$$

$$L = 130 \text{ cm}$$

$$P = 954 \text{ kg}$$

$$E_{\text{pino}} = 131270 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### 5.3.2.1. Momento de inercia

$$I = \left( \frac{b \cdot h^3}{12} + A_{\text{trans}} \cdot Y^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{a \cdot b^3}{12} + (a \cdot b) \cdot (0)^2 \right)$$

$$I = \left( \frac{(5 \text{ cm}) \cdot (8 \text{ cm})^3}{12} \right)$$

$$I = 213.33 \text{ cm}^4$$

### 5.3.2.2. Cálculo de la deflexión

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{pino} \cdot I}$$

$$\delta = \frac{(954 \text{ kg}) \cdot (130 \text{ cm})^3}{48 \cdot \left(131270 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) \cdot (213.33 \text{ cm}^4)}$$

$$\delta = 2,011 \text{ cm}$$

$$\delta = 20.11 \text{ mm}$$

### 5.3.2.3. Cálculo de error

$$E_{\%} = \frac{V_{practico} - V_{real}}{V_{real}}$$

El valor real del desplazamiento es obtenido por medio del software diseñado mismo que muestra la siguiente gráfica.

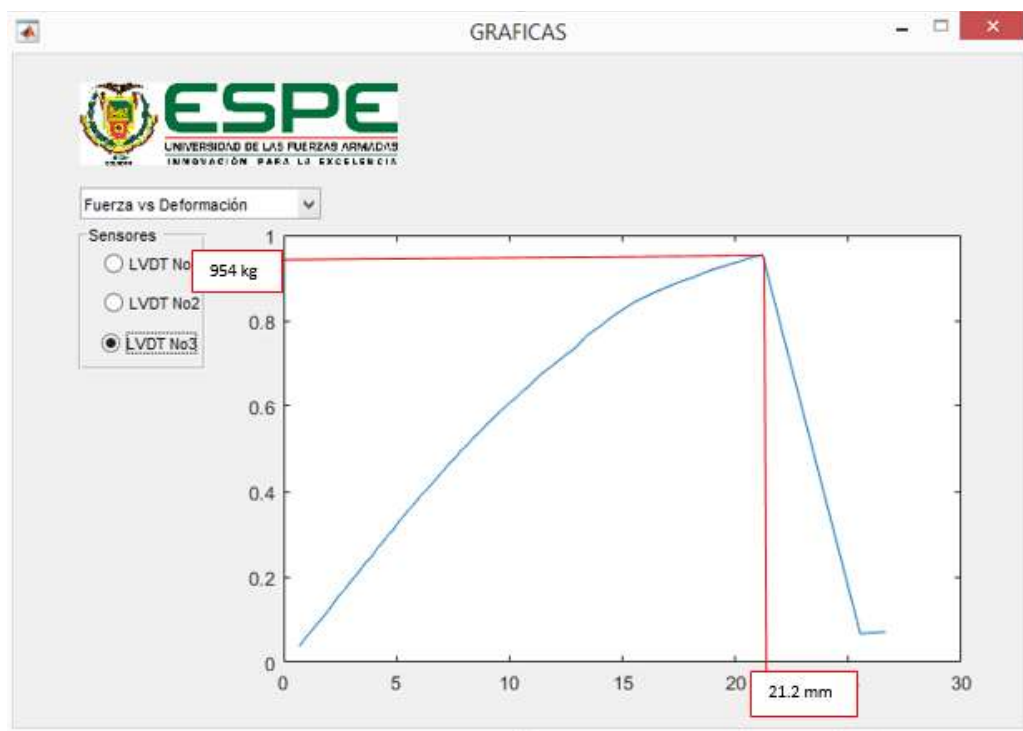


Figura 94 Gráfica de Fuerza Vs Deformación en viga de laurel



Por lo tanto:

$$\delta_{real} = 21.2 \text{ mm}$$

Entonces:

$$E_{\%} = \frac{\delta_{practico} - \delta_{real}}{\delta_{real}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = \frac{20,11 \text{ mm} - 21,2 \text{ mm}}{21,2 \text{ mm}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = 5,14 \%$$

## 5.4 FLEXIÓN EN VIGA DE BAMBÚ

El bambú es un material utilizado para construcción que fácilmente podría competir con materiales como acero y madera, pero por ser el bambú de origen orgánico no se puede definir sus características mecánicas.

### 5.3.1. Propiedades mecánicas:

- Módulo de la elasticidad: 16594 MPa = 169211.71 kg/cm<sup>2</sup>

### 5.3.2. Ensayo de flexión en viga de pino

Se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre

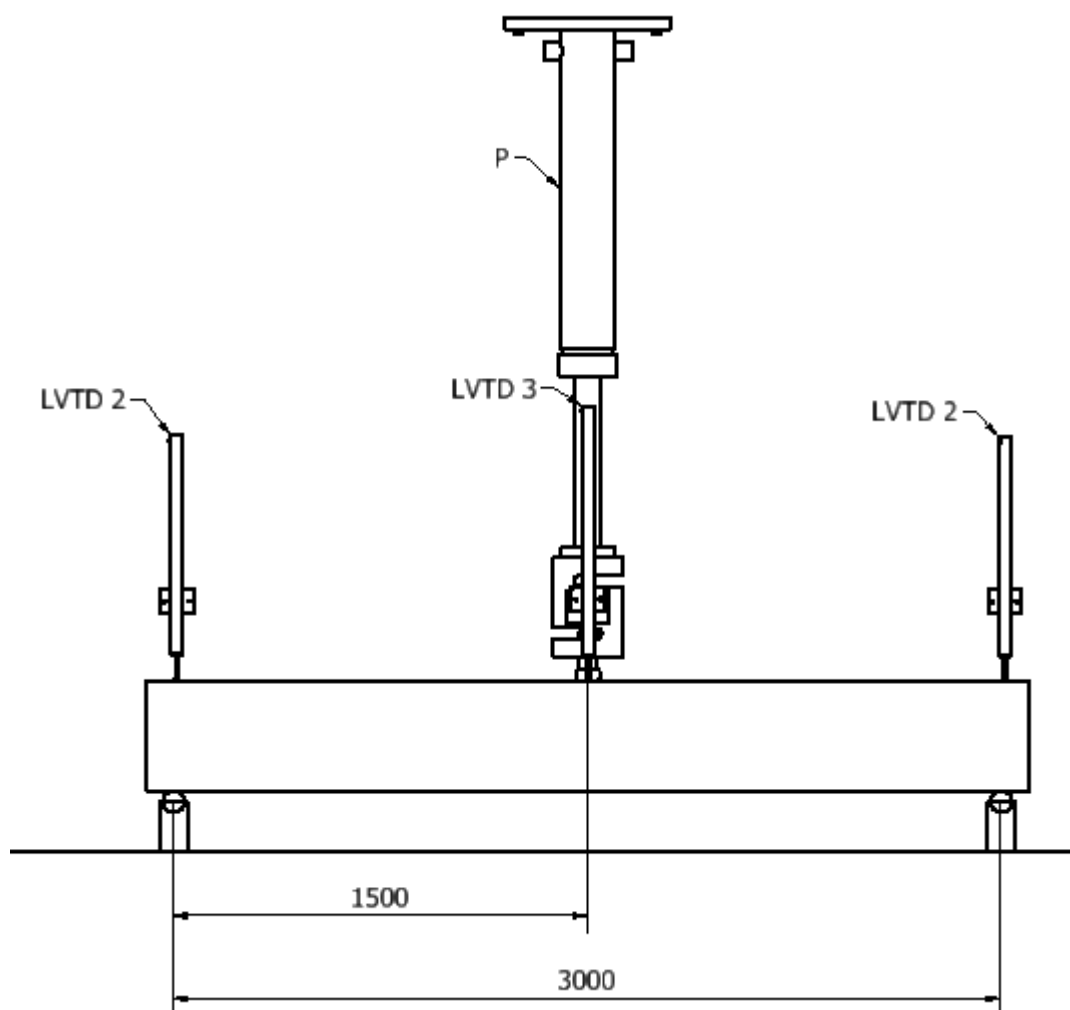


Figura 95 Ensayo de flexión en viga de Bambú (Unidades en milímetros)

Y la siguiente área transversal

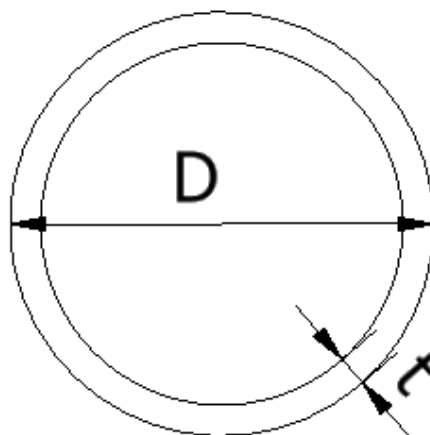


Figura 96 Área transversal (Bambú)

Datos

$$d = 9,1 \text{ cm}$$

$$t = 1.49 \text{ cm}$$

$$L = 300 \text{ cm}$$

$$P = 325 \text{ kg}$$

$$E_{pino} = 169211.71 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### 5.3.2.1. Momento de inercia

$$I = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2t)^4]$$

$$I = \frac{\pi}{64} [9,1^4 - (9,1 - 2(1.49))^4]$$

$$I = \frac{\pi}{64} (5454,66)$$

$$I = 267,75 \text{ cm}^4$$

### 5.3.2.2. Calculo de la deflexión

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{pino} \cdot I}$$

$$\delta = \frac{(325 \text{ kg}) \cdot (300 \text{ cm})^3}{48 \cdot (169211,71) \cdot (267,75 \text{ cm}^4)}$$

$$\delta = 4.035 \text{ cm}$$

$$\delta = 40.35 \text{ mm}$$

### 5.3.2.3. Cálculo de error

$$E_{\%} = \frac{V_{practico} - V_{real}}{V_{real}}$$

El valor real del desplazamiento es obtenido por medio del software diseñado mismo que muestra la siguiente gráfica.

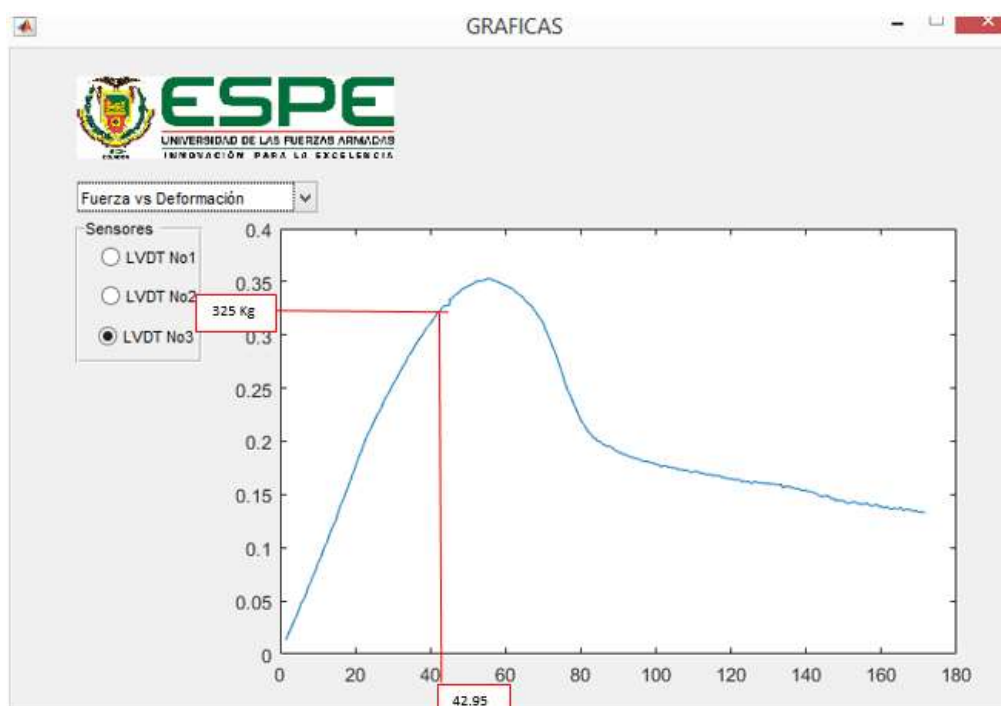


Figura 97 Gráfica de Fuerza Vs Deformación en viga de laurel

Por lo tanto:

$$\delta_{real} = 42.95 \text{ mm}$$

Entonces:

$$E_{\%} = \frac{\delta_{practico} - \delta_{real}}{\delta_{real}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = \frac{40,35 \text{ mm} - 42,95 \text{ mm}}{42,95 \text{ mm}} \cdot 100\%$$

$$E_{\%} = 6,05 \%$$

## CAPITULO VI

### ANÁLISIS ECONÓMICO

En el presente capítulo se detallan todos los rubros de los materiales, insumos, herramientas, materia prima y mano de obra y proceso que han hecho posible la elaboración del proyecto de grado

#### 6.1. COSTOS DE MATERIA PRIMA

**Tabla 22**

Costos de materia prima

| No | Material         | Especificación              | Costo (USD/m) | Costo (USD/m) | Cantidad | Subtotal (USD) |
|----|------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------|----------------|
| 1  | Acero A36        | Plancha de 1500x1500x1.2 mm | 16            | NA            | 1        | 32             |
| 2  | Acero A36        | Plancha de 30x30x2.5mm      | 8             | NA            | 1        | 2.50           |
| 3  | Acero Inoxidable | Plancha de 60x40x12mm       | 12            | NA            | 1        | 6              |
| 4  | Perfil A36       | Angulo de 25x25x2,5mm       | 4,50          | NA            | 0,4      | 1,8            |
| 5  | Acero Inoxidable | Varilla diámetro 10mm       | 4,70          | NA            | 2,2      | 10,34          |
| 6  | Acero Inoxidable | Varilla diámetro 12mm       | 5,25          | NA            | 2,50     | 13,13          |
| 7  | Latón            | Varilla diámetro 24mm       | 4,20          | NA            | 0,25     | 1,05           |
| 8  | Acero A36        | Tubo de diámetro 20x4mm     | 4,60          | NA            | 0,25     | 1,15           |
| 9  | Viga Laurel      | Viga de 1400x60x80 mm       | 5,30          | NA            | 2        | 10,60          |
| 10 | Viga de pino     | Viga de 1400x90x90 mm       | 5,40          | NA            | 3        | 16,20          |
| 11 | Perno M10        | Perno Allen M10             | NA            | 12            | 0,16     | 1,95           |
| 12 | Perno M5         | Prisionero M5x08 mm         | N/A           | 5             | 0.12     | 0,60           |

Continua →

|              |           |                            |    |   |      |              |
|--------------|-----------|----------------------------|----|---|------|--------------|
| 13           | Perno M8  | Perno hexagonal M8x1,5x12  | NA | 4 | 0,14 | 0,56         |
| 14           | Tuerca M8 | Tuerca hexagonal M8x1,5x12 | NA | 4 | 0,8  | 0,32         |
| <b>Total</b> |           |                            |    |   |      | <b>98,20</b> |

## 6.2. COSTOS DE MATERIALES MECÁNICOS, ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

**Tabla 23**

Costos de materiales mecánicos, eléctricos y electrónicos

| No | Ítem                            | Descripción                           | Cantidad | USD C/U | Subtotal (USD) |
|----|---------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------------|
| 1  | Electroválvula                  | Válvula hidráulica 2/2                | 1        | 105     | 105            |
| 2  | Mangueras hidráulicas           | Mangueras hidráulicas de alta presión | 3        | 29      | 87             |
| 3  | Controlador Lógico              | PLC S7-1200 CPU 1212C AC/DC/RLY       | 1        | 300     | 300            |
| 4  | Módulo de amplificación         | Signal board SB1222                   | 1        | 134     | 134            |
| 5  | Motor a pasos                   | Motor Xinje 4,2 N.m 1.8°/paso         | 1        | 220     | 220            |
| 6  | Driver control de motor         | Driver Xinje Dp-508                   | 1        | 30      | 30             |
| 7  | Fuente de alimentación          | Fuente 120AC/24DC/4.5a                | 1        | 25      | 25             |
| 8  | Pulsador con indicador luminoso | Pulsador 24V DC (verde)               | 2        | 7,25    | 14,50          |
| 9  | Pulsador con indicador luminoso | Pulsador 24V DC (rojo)                | 1        | 7,25    | 7,25           |
| 10 | Indicador luminoso              | Indicador luminoso 120V AC (rojo)     | 1        | 2,70    | 2,70           |
| 11 | Indicador luminoso              | Indicador luminoso 24V DC (rojo)      | 1        | 2.40    | 2,40           |

**Continua →**

|              |                    |                                   |    |      |               |
|--------------|--------------------|-----------------------------------|----|------|---------------|
| 12           | Pulsador           | Pulsador emergencia 24V DC        | 1  | 3,10 | 3,10          |
| 13           | Llave de seguridad | Llave de seguridad ON/OFF 24V DC  | 1  | 6,15 | 6,15          |
| 14           | Selector           | Selector de dos posiciones 24V DC | 1  | 2,20 | 2,20          |
| 15           | Potenciómetro      | Potenciómetro de precisión 2kohm  | 1  | 12   | 12            |
| 15           | Switch térmico     | Térmico monofásico 120V AC 6A     | 2  | 6,60 | 13,20         |
| 16           | Fusible            | Fusible cerámico 6A               | 2  | 1,30 | 2,60          |
| 17           | Resistencias       | Resistencias ¼ w                  | 15 | 0,03 | 0,45          |
| 18           | Capacitores        | Capacitores electrolíticos        | 4  | 0,08 | 0,23          |
| 19           | Transistores       | Transistores 2N3904               | 4  | 0,03 | 0,12          |
| 20           | Integrado          | LM7805                            | 1  | 0,35 | 0,35          |
| 21           | Led indicadores    | Led 3.2V (verde)                  | 3  | 0,12 | 0,36          |
| <b>Total</b> |                    |                                   |    |      | <b>968,61</b> |

### 6.3. COSTOS DE MATERIALES PARA ARMADO DE TABLERO Y MÓDULOS

**Tabla 24**

Costos de materiales para armado de tablero y módulos

| No | Ítem              | Descripción                      | Cantidad   | USD (c/u)  | Subtotal (USD) |
|----|-------------------|----------------------------------|------------|------------|----------------|
| 1  | Tablero eléctrico | Tablero eléctrico 600x400x200 mm | 1          | 56         | 56             |
| 2  | Cable conductor   | Cable AWG #18                    | 100 metros | 0,22/metro | 22             |
| 3  | Borneras          | Borneras                         | 50         | 0,15       | 7,5            |

**Continua →**

|   |                     |                               |          |              |              |
|---|---------------------|-------------------------------|----------|--------------|--------------|
| 4 | Baquelita de cobre  | Baquelita de cobre 297x210 mm | 1        | 2,30         | 2,30         |
| 5 | Acido               | Cloruro férrico               | 100 gr   | 2            | 2            |
| 6 | Alambre para caudín | Estaño                        | 5 metros | 0,25         | 1,25         |
|   |                     |                               |          | <b>Total</b> | <b>91,05</b> |

#### 6.4. COSTOS DE LOS PROCESOS UTILIZADOS PARA CONSTRUCCIÓN DE ACCESORIOS

**Tabla 25**

Costos de procesos utilizados para construcción de accesorios

| No | Proceso           | Utilización   | Costo (USD)  |              |
|----|-------------------|---|--------------|--------------|
| 1  | Doblado           | Doblado de pliegues para tablero de panel de control      | 18,50        |              |
| 2  | Perforado         | Perforación de agujeros para botones del panel de control | 10           |              |
| 3  | Soldadura de arco | Suelda de juntas para soporte de sensores LVDT'S          | 8,60         |              |
| 4  | Torneado          | Torneado de acople eje-motor                              | 22,50        |              |
| 5  | Rectificado plano | Rectificado de base de los soportes para sensores LVDT's  | 15,30        |              |
| 6  | Pintura           | Pintura de mesa para panel de control                     | 13,70        |              |
|    |                   |   | <b>Total</b> | <b>88,70</b> |

#### 6.5. COSTOS DE MANO DE OBRA

**Tabla 26**

Costos de mano de obra

| No | Cargo       | Horas | Costo/hora (USD) | Total (USD) |
|----|-------------|-------|------------------|-------------|
| 2  | Proyectista | 500   | 3,75             | 1875        |



## 6.6. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

**Tabla 27**

Costo total del proyecto

| No | Descripción   | Subtotal (USD) |
|----|---|----------------|
| 1  | Costos de materia prima   | 98,20          |
| 2  | Costos de materiales mecánicos, eléctricos y electrónicos         | 968,61         |
| 3  | Costos de materiales para armado de tablero y módulos             | 91,05          |
| 4  | Costos de los procesos utilizados para construcción de accesorios | 88,70          |
| 5  | Costos de mano de obra  | 1875           |
|    | <b>Total</b>  | <b>3121,56</b> |

Cabe mencionar que el costo de mano de obra, así como también la realización de algunos procesos ha sido efectuada por los integrantes de este proyecto.

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- EL equipo fue modernizado y funciona de manera semiautomática. Este tiene la facultad de realizar procesos manuales y automáticos según sea la necesidad, obviando procesos en los que antiguamente era primordial la interacción del usuario para su funcionamiento, como la aplicación de la carga mediante una válvula manual. Así mismo la toma de datos tanto de carga como de los desplazamientos lineales eran obtenidos mediante la observación de un comparador de reloj lo que producía un mayor error en el análisis de los datos de la práctica, este error fue corregido mediante un sistema moderno de adquisición y tratamiento de datos.
- Se realiza una interfaz HMI amigable y fácil de comprender. Esta HMI permite la interacción entre la máquina y el usuario, pudiendo este último operar la máquina de manera remota. Adicionalmente muestra los datos obtenidos de los diferentes sensores y realiza las gráficas correspondientes a la flexión de vigas.
- Todos los sensores utilizados tienen teóricamente una resolución infinita por ser sensores analógicos, pero en la práctica al utilizar los canales de comunicación y operaciones de procesamiento de señal se introducen ruidos y distorsiones, por tal motivo la resolución mínima de los sensores fue limitada mediante software tomando en cuenta las cifras más significativas que presentaban la menor variación, teniendo así una resolución mínima de  $1 \times 10^{-5}$  metros.
- Se logró realizar una comunicación nativa entre el HMI y el PLC S7-1200, utilizando las librerías específicas para comunicación TCP/IP para la

plataforma de Windows (Winsock). Con esto se evitó utilizar un servidor OPC, haciendo un software HMI más eficiente y ahorrando dinero con la compra de alguna licencia comercial de un servidor OPC.

- Se implementaron un conjunto de reglas lógicas de programación en el HMI y PLC provocando que el equipo funcione de manera integral y ayudando a que los datos de la práctica sean fiables y represente un valor semejante a la realidad
- Se ha diseñado una máquina que presenta una veracidad y confiabilidad muy alta ya que se ha obtenido un valor máximo de error de carga aplicada por la máquina de 1.2% en el proceso de calibración de la celda de carga, cumpliendo con el requisito para diseño de máquinas que debe operar un error máximo del 2%.
- Las gráficas obtenidas así como también la tabulación de datos nos ayudaran para realizar un análisis integral sobre las características mecánicas de los materiales de esta forma podremos calcular propiedades tales como módulo de elasticidad, máximo esfuerzo de flexión, deflexión máxima o a su vez identificar un material con las características mecánicas calculadas a partir de los resultados de la práctica.
- Los resultados alcanzados en las pruebas realizadas en diferentes materiales revelan que los errores obtenidos son bajos. En el ensayo con el Laurel y pino se tiene un error relativo de 5.14% y 1.96% respectivamente, que pueden producirse por el nivel de humedad y el sentido de las fibras que lo componen, a su vez también para el ensayo en viga de dos materiales (Hormigo-Acero) el error presentado fue de 4,78% producido probablemente por la composición a la que se encuentra el hormigón, y por último se realizó el ensayo en una viga de bambú presentando un valor de 6.05% de error, esto se da debido a que la viga

no tiene una forma regular. Estos valores son admisibles cuando se trata de una práctica de laboratorio.

- Como inicialmente planteamos el costo de una modernización resultó mucho menor al costo que conllevaría comprar una máquina nueva de las mismas características. En la tabla 26 se muestra el dinero total que fue necesario para llevar a cabo este proyecto (\$3121), lo que indica un ahorro considerable tomando en cuenta que la mano de obra fue netamente comprendida por los integrantes del proyecto, así como también algunos procesos fueron realizados en las instalaciones de la universidad en sus respectivos laboratorios y algunos equipos y materiales ya eran parte de la máquina.
- El software HMI fue diseñado para que pueda trabajar de forma independientemente del Vibróforo, dándole una característica de portabilidad. Es decir, los sensores LVDT, la celda de carga y el datalogger puede ser cambiado a otro equipo similar y mediante el Modo Monitor poder observar los valores que corresponden a cada sensor.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

- Se sugiere utilizar vigas que tengan forma prismática de lados regulares para facilitar la disposición sobre los apoyos. Para vigas de forma cilíndrica es recomendable usar apoyos que se adapten a la forma y colocarla sobre un material antideslizante como por ejemplo caucho. Todas las vigas que van a someterse al ensayo deben soportar una carga mínima de 50 Kgf para que la práctica pueda ser llevada a cabo.
- Se recomienda seguir con la investigación y adaptación de la modernización del vibróforo puesto que este cuenta con otra aplicabilidad que corresponde a las cargas dinámicas y podría aportar valiosamente al desarrollo de nuevas prácticas de laboratorio y contribuir con un mayor conocimiento científico en la materia.

- Se recomienda investigar por parte de un nuevo tesista un poco más sobre el módulo de conexión de galgas extensiométricas que posee el datalogger RDP. Este podría facilitar el desarrollo de la práctica de esfuerzos combinados sobre pórticos, convirtiendo la HMI en una interface que integra varias prácticas.
- Revisar el Manual de Funcionamiento donde se indica los pasos para un correcto manejo del equipo, así también como los cuidados que deben darle para extender el tiempo de vida útil.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, C., & Montalvo, F. (1998). Tesis de Ing. Mec. Escuela Politécnica del Ejército. *Implementación del Vibróforo de Baja Frecuencia marca Amsler*, 9. Sangolquí, Ecuador.
- Araujo, L. (2006). Tesis de Ing. Mec. Escuela Politécnica del Ejército. *Simulación y análisis del comportamiento mecánico de una tapa para pozo de drenaje utilizando rosetas de deformación*, 80. Sangolquí, Ecuador.
- Cableseletricos. (1 de Abril de 2015). *Cables Eléctricos*. Obtenido de <http://cableseletricos.cl/articulos/capacidad-de-transporte-de-los-conductores/>
- COOPER, W., & HELFRICK, A. (1991). *Instrumentación electrónica moderna y Técnicas de medición*. (Vol. Primera Edición). Mexico: Prentice Hall. Obtenido de El imperio electricista.
- García, E. (2016). *Transductores de posición y desplazamiento*. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de Docplayer: <http://ocw.uc3m.es/tecnologia-electronica/instrumentacion-electronica-i/material-de-clase-1/Tema7.pdf>
- González, J. (2016). *Transductores de desplazamiento lineal*. Recuperado el 24 de Abril de 2016, de Instrumentación Electrónica: [http://www.acema.com.ar/biblioteca/databases/download/T13\\_desplin.pdf](http://www.acema.com.ar/biblioteca/databases/download/T13_desplin.pdf)
- LoveJoy. (2010). *LoveJoy Couplings Solutions*.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Mexico: Pearson Education.
- National Instruments. (2016). *¿Qué es Adquisición de Datos?* Recuperado el 6 de Abril de 2016, de Ni.com: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- Ogata, K. (1987). *Dinámica de Sistemas*. México: Prentice Hall.
- Pérez, J. (01 de Marzo de 2013). *Mecánica de Materiales*. Sangolquí, Ecuador.

- RDP Group. (2016). *Modular 600 Multi-Channel Signal Conditioning System*. Recuperado el 18 de Abril de 2016, de rdpe.com:  
<http://www.rdpe.com/us/m600.htm>
- SIEMENS. (2016). *Células de Carga*. Recuperado el 25 de Abril de 2016, de Siemens.com: <http://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/es/sistemas-de-pesaje-y-dosificacion/celulas-de-carga/celulas-de-carga-de-plataforma/pages/celula-de-carga-siwarex-wl260-sp-s-ae.aspx>
- SIEMENS. (2016). Manual de sistema. *Controlador Programable S7-1200*. Recuperado el 26 de Abril de 2016, de <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>
- SIEMENS. (2017). Hoja de datos. *SIMATIC S7-1200, SALIDA DIGITAL SB 1222, 4DQ, 5VDC 200K*. Recuperado el 9 de 01 de 2017, de <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6ES7222-1AD30-0XB0>
- SparkFun Electronics. (2016). *Analog vs. Digital*. Recuperado el 27 de Abril de 2016, de learn.sparkfun.com:  
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/analog-vs-digital>
- Tito, J. (2011). *LVDTs Go the Distane*. Recuperado el 27 de Abril de 2011, de DesingNews.com:  
[http://www.designnews.com/author.asp?section\\_id=1386&doc\\_id=229901](http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1386&doc_id=229901)
- Vaikon. (2013). *Manual del Electricista*. Monterrey.
- Xinje. (2012). *DP-504/DP-508 Stepper Driver*. Wuxi.
- Zwick. (2016). *Vibrophores*. Recuperado el 10 de 3 de 2016, de Zwick.com:  
<http://www.zwick.com/en/products/dynamic-and-fatigue-testing-machines/vibrophores-from-5-to-550-kn.html>

## **ANEXOS**