



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
AUTOMOTRIZ**

**TEMA: “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE VELOCIDAD  
PARA MÁQUINA DE ENSAYOS A FATIGA ROTATIVA Y APLICACIÓN  
EXPERIMENTAL.”**

**AUTORES: GUALAVISÍ GUZMÁN ANGEL ALEXANDER  
HARO GONZÁLEZ CRISTIAN JEAMPIER**

**DIRECTOR: ING. FERNANDO RENATO RAMÍREZ PAREDES, PHD.**

**Ibarra, 2024**

**CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR**

Ibarra, 25 de junio de 2024

Ing. Fernando Renato Ramírez Paredes, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**CERTIFICA:**

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

(f) 

Ing. Fernando Renato Ramírez Paredes, PhD.

C.C.: 1709992703



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1727679415		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Gualavisí Guzmán Angel Alexander		
DIRECCIÓN:	Cayambe – Pichincha-Ecuador		
EMAIL:	<a href="mailto:aagualavisig@utn.edu.ec">aagualavisig@utn.edu.ec</a>		
TELÉFONO FIJO:	2 127-797	TELÉFONO MÓVIL:	0980136061

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1750976027		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Haro González Cristian Jeampier		
DIRECCIÓN:	Cayambe – Pichincha-Ecuador		
EMAIL:	<a href="mailto:cjharog@utn.edu.ec">cjharog@utn.edu.ec</a>		
TELÉFONO FIJO:	3 480-181	TELÉFONO MÓVIL:	0997096925

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	<b>“IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE VELOCIDAD PARA MÁQUINA DE ENSAYOS A FATIGA ROTATIVA Y APLICACIÓN EXPERIMENTAL”</b>
AUTOR (ES):	Gualavisí Guzmán Angel Alexander Haro González Cristian Jeampier
FECHA: DD/MM/AAAA	2024/06/25
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO AUTOMOTRIZ
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Fernando Renato Ramirez Paredes PhD. Ing. Fausto Eduardo Tapia Gudiño MSc.

## CONSTANCIAS

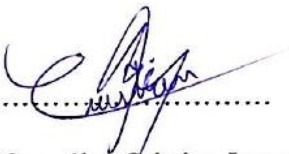
El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el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

Ibarra, a los 25 días del mes de junio de 2024

### EL AUTOR(ES):

(Firma).....

Nombre: Gualavisí Guzmán Angel Alexander

(Firma).....

Nombre: Haro González Cristian Jeampier

## **DEDICATORIA**

El siguiente trabajo va dedicado para todas aquellas personas que me apoyaron siempre en este largo camino de vida universitaria como lo son mi familia y amistades cercanas las cuales me brindaron consejos y apoyo en todo momento para lograr salir adelante, no menos importante a todos mis profesores que conocí durante este proceso llenándome de grandes experiencias y recuerdos de vida.

**CRISTIAN HARO**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por brindarme su apoyo incondicional y amor en todo momento

A mi tutor, Ing. Fernando Ramírez PhD. Por su guía y acompañamiento, que fue muy esencial para la realización de este trabajo.

A mi compañero de trabajo de grado, por su colaboración para la realización de este trabajo.

A mis profesores de toda la vida estudiantil que gracias a la impartición de sus conocimientos pude culminar mis estudios de ingeniería.

**ANGEL GUALAVISÍ**

Agradezco a la institución, a sus docentes por compartir sus conocimientos y prepararnos para una futura vida profesional. Al Ing. Fernando Ramírez PhD. Por sus consejos como tutor del presente trabajo de grado. Finalmente, pero no menos importante a mi compañero de tesis que estuvo en la ejecución arduamente de este proyecto de titulación.

**CRISTIAN HARO**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xvi</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivos .....	1
1.1.1 Objetivo general.....	1
1.1.2 Objetivos específicos .....	1
1.2 Justificación .....	1
1.3 Fatiga.....	2
1.5 Resistencia a la fatiga.....	4
1.5.1 Criterio de goodman .....	5
1.5.2 Criterio de goodman modificado .....	6
1.5.3 Criterio de sodberg.....	7
1.5.4 Criterio de gerber .....	8
1.5.5 Criterio de resistencia a fatiga para tensiones medias negativas .....	9
1.6 Límite de resistencia a fatiga .....	10
1.6.1 Factor de condición superficial ( <b>ka</b> ) .....	11
1.6.2 Factor de tamaño ( <b>kb</b> ).....	11
1.6.3 Factor de carga ( <b>kc</b> ) .....	12
1.6.4 Factor de temperatura ( <b>kd</b> ) .....	12
1.6.5 Factor de confiabilidad ( <b>ke</b> ).....	13
1.6.6 Factor de varios efectos ( <b>kf</b> ) .....	14
1.6.7 Límite de resistencia a la fatiga ( <b>S'e</b> ).....	14
1.7 Diagrama de wöhler.....	16
1.8 Regímenes de fatiga.....	17
1.8.1 Fatiga a bajo ciclaje .....	17
1.8.2 Fatiga a alto ciclaje .....	17
1.9 Rugosidad .....	18
1.9.1 Acabado superficial .....	18
1.9.2 Tabla e indicaciones de rugosidad superficial .....	19
1.10 Automatización.....	22

1.10.1	Sensores .....	22
1.10.2	Controlador .....	23
1.10.3	PLC (CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE) .....	23
1.10.4	HMI (HUMAN MACHINE INTERFACE).....	23
1.11	Tipos de control de velocidad para motores de inducción.....	24
1.11.1	Control de velocidad mediante el cambio de polos .....	24
1.11.2	Control de velocidad mediante variador de frecuencia de alimentación .....	24
1.11.3	Control de velocidad mediante modificación del deslizamiento .....	25
1.11.4	Control de velocidad mediante cambio de voltaje de línea .....	25
1.11.5	MÉTODOS DE CONTROL MODERNOS.....	25
1.11.5.1	Control escalar.....	26
1.11.5.2	Control vectorial.....	26
1.12	Normas aplicadas para ensayos a fatiga.....	26
1.12.1	NORMA ASTM E466 .....	27
1.12.2	NORMA ASTM E606 .....	27
1.13	Probetas.....	27
1.13.1	ASTM A370.....	28
1.14	Material de ensayo: acero aisi 1018.....	28
<b>CAPITULO II .....</b>		<b>29</b>
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>		<b>29</b>
2.1.1	Etapas de metodología.....	29
2.1.1.1	Etapa 1.....	29
2.1.1.2	Etapa 2.....	29
2.1.1.3	Etapa 3.....	29
2.1.1.4	Etapa 4.....	30
2.2	Selección de materiales y equipos .....	30
2.2.1	Equipos necesarios para el sistema de control.....	31
2.2.1.1	Motor trifásico WEG W22 .....	31
2.2.1.2	Variador de frecuencia DELTA MS 300.....	32
2.2.1.3	PLC DELTA DVP20SX211T .....	32
2.2.1.4	HMI DELTA DOP-103BQ.....	33
2.2.1.5	Módulo de celda de carga.....	34
2.2.1.6	Actuador lineal .....	34
2.2.2	Herramientas digitales .....	34



2.2.3	Software de programación “Delta ISPSOft” .....	35
2.3	Constatación del diseño preliminar.....	36
2.3.1	Motor .....	37
2.3.2	Sistema de aplicación de carga .....	37
2.3.3	Sistema de sujeción de la probeta .....	38
2.3.4	Sistema eléctrico y de encendido.....	38
2.3.5	Contador de revoluciones .....	39
2.3.6	Análisis del funcionamiento actual de la máquina .....	40
2.4	Consideraciones de las probetas .....	40
2.5	Rediseño del sistema de carga .....	41
2.5.1	Propuesta de diseño .....	41
2.5.2	Análisis de diseño de sistema de carga .....	41
2.6	Diseño de la placa de fuerza .....	47
2.7	Diseño cad.....	55
2.7.1	Modelo final.....	55
2.8	Diseño del sistema de control .....	55
2.9	Montaje de componentes eléctricos y electrónicos.....	56
2.9.1	Montaje de motor trifásico.....	56
2.9.2	Montaje de componentes eléctricos y electrónicos en la caja de accesorios.....	57
2.9.3	Montaje de HMI.....	57
2.9.4	Montaje de placa de fuerza .....	58
2.9.5	Montaje de placa soporte de actuador lineal.....	58
2.9.6	Montaje de celda de carga.....	59
2.9.7	Montaje de actuador lineal.....	59
2.10	Automatización .....	60
2.10.1	Diagramas de instrumentación.....	60
2.10.2	Diagramas de conexión de plc .....	61
2.10.3	Plano eléctrico.....	62
2.11	Programación .....	63
2.11.1	Programación de variador de frecuencia .....	65
2.12	Programación y diseño de HMI .....	66
2.13	Alineación de la máquina.....	67
2.14	Análisis de costos.....	67
2.14.1	Costos de materiales y equipos eléctricos y electrónicos .....	67

2.14.2Costo de elementos mecánicos .....	68
2.14.3Costos varios.....	68
2.14.4Costo total del proyecto .....	69
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>70</b>
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
3.1 Etapa final del ensamble .....	70
3.2 Medición de rugosidad de las probetas.....	70
3.3 Valores teóricos para los ensayos a fatiga .....	71
3.4 Resultados de ensayos.....	75
3.4.1 Ensayos sin carga.....	75
3.4.2 Ensayos con carga.....	75
3.4.3 Análisis de resultados .....	79
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>80</b>
<b>4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
4.1 Conclusiones .....	80
4.2 Recomendaciones .....	81
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLAS NÚMERO	DESCRIPCIÓN	PÁG
1.1	Factor de condición superficial .....	11
1.2	Factor de temperatura.....	13
1.3	Factor de confiabilidad.....	14
1.4	Simbología de rugosidad.....	20
1.5	Tabla de rugosidad .....	20
1.6	Dirección de estrías .....	21
1.7	Propiedades del acero AISI 1018.....	28
2.1	Materiales .....	31
2.2	Ficha técnica motor trifásico.....	32
2.3	Ficha técnica variador de frecuencia.....	32
2.4	Ficha técnica PLC DELTA DVP20SX211T .....	33
2.5	Ficha técnica HMI DELTA DOP-103BQ.....	33
2.6	Módulo de celda de carga .....	34
2.7	Actuador lineal .....	34
2.8	Acabado superficial.....	41
2.9	Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.....	47
2.10	Variables PLC .....	61
2.11	Programación de variador de frecuencia.....	65
2.12	Costo de materiales .....	67
2.13	Costo de materiales mecánicos .....	68
2.14	Costos varios .....	69
2.15	Costo total del proyecto .....	69
3.1	Tabla rugosidad.....	71
3.2	Valores teóricos de esfuerzo a fatiga .....	74
3.3	Resultados de ensayos con rugosidad 0,46 ( $\mu\text{m}$ ).....	76
3.4	Resultados de ensayos con rugosidad 1,19 ( $\mu\text{m}$ ).....	76
3.5	Resultados de ensayos con rugosidad 1,98 ( $\mu\text{m}$ ).....	77
3.6	comparación de ciclos de vida de probetas con diferente rugosidad .....	78

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIONES NÚMERO	DESCRIPCIÓN	PÁG
[1.1]	.....	3
[1.2]	.....	4
[1.3]	.....	4
[1.4]	.....	4
[1.5]	.....	4
[1.6]	.....	5
[1.7]	.....	5
[1.8]	.....	6
[1.9]	.....	6
[1.10]	.....	8
[1.11]	.....	9
[1.12]	.....	9
[1.13]	.....	10
[1.14]	.....	10
[1.15]	.....	11
[1.16]	.....	12
[1.17]	.....	12
[1.18]	.....	12
[1.19]	.....	12
[1.20]	.....	12
[1.21]	.....	13
[1.22]	.....	14
[1.23]	.....	15
[2.1]	.....	42
[2.2]	.....	43
[2.3]	.....	43
[2.4]	.....	43
[2.5]	.....	43
[2.6]	.....	43
[2.7]	.....	43

[2.8].....	44
[2.9].....	44
[2.10].....	45
[2.11].....	45
[2.12].....	45
[2.13].....	45
[2.14].....	46
[2.15].....	46
[2.16].....	46
[2.17].....	46
[2.18].....	46
[2.19].....	47
[2.20].....	48
[2.21].....	48
[2.22].....	48
[2.23].....	48
[2.24].....	49
[2.25].....	49
[2.26].....	49
[2.27].....	50
[2.28].....	50
[2.29].....	51
[2.30].....	51
[2.31].....	51
[2.32].....	52
[2.33].....	52
[2.34].....	52
[2.35].....	52
[3.1].....	74
[3.2].....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURAS NÚMERO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PÁG</b>
1.1	Número de publicaciones relativas a fatiga de materiales .....	xvi
1.2	Esfuerzo fluctuante sinusoidal .....	4
1.3	Fracción de resistencia a la fatiga .....	5
1.4	Criterio de Goodman.....	6
1.5	Criterio de Goodman modificado en las zonas de fallo y segura.....	7
1.6	Criterio de Soderberg .....	8
1.7	Zona de fallo y segura del criterio de Gerber.....	9
1.8	Zonas de fallo y seguras .....	10
1.9	Límite de resistencia a la fatiga.....	15
1.10	Diagrama de Wöhler .....	16
1.11	Acabado superficial.....	19
1.12	Dimensiones características de la probeta .....	27
2.1	Flujograma de proceso metodológico .....	30
2.2	Bloques de programa – Ladder .....	35
2.3	Interfaz de Ladder .....	36
2.4	Máquina original .....	36
2.5	Motor.....	37
2.6	Dinamómetro digital y manivela.....	38
2.7	Sujeción de probeta .....	38
2.8	Tablero eléctrico .....	39
2.9	Sensor inductivo.....	39
2.10	Dimensiones de probeta .....	40
2.11	Análisis de sistema de carga .....	42
2.12	Fuerza y momento flector tramo A-B .....	43
2.13	Fuerza y momento flector tramo B-C .....	44
2.14	Fuerza y momento flector tramo C-D .....	44
2.15	Diagrama de corte y momento flector.....	45
2.16	Placa de fuerza .....	47
2.17	Diagrama de cuerpo libre .....	48
2.18	Fuerza y momento flector tramo A-B .....	49

<b>2.19</b>	<b>Fuerza y momento flector tramo B-C .....</b>	<b>49</b>
<b>2.20</b>	<b>Diagrama de corte y momento flector.....</b>	<b>50</b>
<b>2.21</b>	<b>Diagrama de cuerpo libre de placa de fuerza .....</b>	<b>53</b>
<b>2.22</b>	<b>Modelo final.....</b>	<b>55</b>
<b>2.23</b>	<b>Esquema de sistema de control .....</b>	<b>56</b>
<b>2.24</b>	<b>Motor trifásico WEG .....</b>	<b>56</b>
<b>2.25</b>	<b>Gabinete .....</b>	<b>57</b>
<b>2.26</b>	<b>Montaje de HMI.....</b>	<b>58</b>
<b>2.27</b>	<b>Montaje de placa de fuerza .....</b>	<b>58</b>
<b>2.28</b>	<b>Montaje de placa soporte de actuador lineal .....</b>	<b>59</b>
<b>2.29</b>	<b>Montaje de celda de carga.....</b>	<b>59</b>
<b>2.30</b>	<b>Montaje de actuador lineal .....</b>	<b>60</b>
<b>2.31</b>	<b>Diagrama de instrumentación .....</b>	<b>60</b>
<b>2.32</b>	<b>Diagrama de conexión del PLC .....</b>	<b>61</b>
<b>2.33</b>	<b>Plano eléctrico.....</b>	<b>62</b>
<b>2.34</b>	<b>Diagrama de flujo de la programación.....</b>	<b>64</b>
<b>2.35</b>	<b>Bienvenida HMI.....</b>	<b>66</b>
<b>2.36</b>	<b>Preconfiguración de velocidad y carga .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1</b>	<b>Ensamble final.....</b>	<b>70</b>
<b>3.2</b>	<b>Diagrama S-N logarítmico, con probetas de rugosidad Ra 0,46 (um) .....</b>	<b>76</b>
<b>3.3</b>	<b>Diagrama S-N logarítmico, con probetas de rugosidad Ra 1,19 (um) .....</b>	<b>77</b>
<b>3.4</b>	<b>Diagrama S-N logarítmico, con probetas de rugosidad Ra 1,98 (um) .....</b>	<b>78</b>
<b>3.5</b>	<b>Comparación de curvas S-N teóricas con resultados obtenidos experimentalmente..</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS NÚMERO	DESCRIPCIÓN	PÁG
<b>AII.1</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>99</b>
<b>AII.2</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>100</b>
<b>AII.3</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>101</b>
<b>AII.4</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>102</b>
<b>AII.5</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>103</b>
<b>AII.6</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>104</b>
<b>AII.7</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>105</b>
<b>AII.8</b>	Informe de probeta con granulación N°60.....	<b>106</b>
<b>AIII.1</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>107</b>
<b>AIII.2</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>108</b>
<b>AIII.3</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>109</b>
<b>AIII.4</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>110</b>
<b>AIII.5</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>111</b>
<b>AIII.6</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>112</b>
<b>AIII.7</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>113</b>
<b>AIII.8</b>	Informe de probeta con granulación N°30 .....	<b>114</b>
<b>AIV.1</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>115</b>
<b>AIV.2</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>116</b>
<b>AIV.3</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>117</b>
<b>AIV.4</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>118</b>
<b>AIV.5</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>119</b>
<b>AIV.6</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>120</b>
<b>AIV.7</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>121</b>
<b>AIV.8</b>	Informe de probeta con granulación N°120.....	<b>122</b>



## RESUMEN

Este trabajo de investigación constituye una continuación de una investigación previa presentada en la carrera de Ingeniería Automotriz (CIAUT) de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (FICA). Su objetivo principal es analizar el comportamiento de los elementos sometidos a cargas dinámicas, centrándose particularmente en el estudio de la fatiga de materiales en aceros. El proyecto se planteó con el objetivo de rediseñar y mejorar la máquina existente para ensayos de fatiga por flexión rotativa en los talleres de la carrera de Ingeniería Automotriz. Se ha implementado un sistema de automatización y control. Sin embargo, se identificó que el sistema de aplicación de carga era deficiente, por tal motivo se desarrolló el rediseño de este sistema. Este enfoque tenía como idea principal facilitar los ensayos de fatiga por flexión rotativa. La introducción de sensores, la automatización y las mejoras mecánicas reducen el error humano durante los ensayos, permitiendo la obtención de datos con una mayor precisión. La automatización de la máquina se considera una herramienta crucial, ya que optimiza la ejecución del proceso y aumenta la autonomía de la máquina con una mínima intervención del operador. Además, la interfaz HMI (Interfaz de Usuario Humano-Máquina) se presenta como un complemento que agiliza la operación y el control del proceso, al tiempo que facilita el monitoreo constante de las variables físicas en tiempo real. Con las modificaciones implementadas en la máquina se obtuvo valores experimentales que se acercan a la curva teórica S-N del acero AISI 1018 con errores promedio inferior al 10 % en comparación de los valores teóricos.

**Palabras claves:** Curva S-N, AISI 1018, Rugosidad, Fatiga de aceros, Automatización.

## ABSTRACT

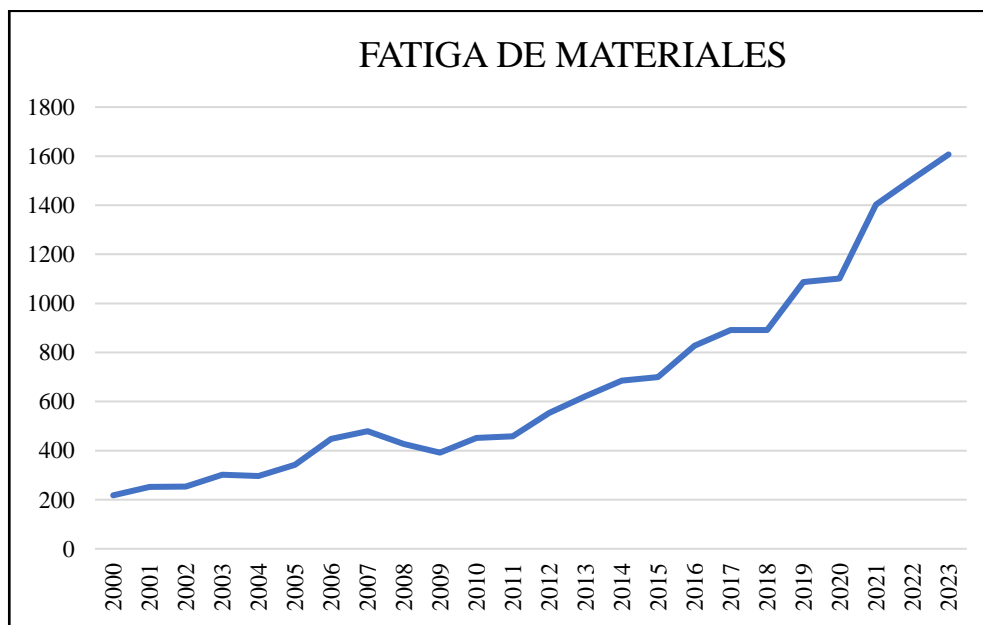
This research work is a continuation of a previous research presented at the Automotive Engineering career (CIAUT) of the School of Engineering in Applied Sciences (FICA). Its main objective is to analyze the behavior of elements subjected to dynamic loads, focusing particularly on the study of material fatigue in steels. The project was proposed with the objective of redesigning and improving the existing machine for fatigue testing by rotary bending in the Automotive Engineering laboratories. An automation and control system were implemented. However, it was identified that the load application system was deficient, and for this reason the redesign of this system was developed. The main idea of this approach was to facilitate fatigue tests by rotary bending. The introduction of sensors, automation and mechanical improvements reduce human error during the tests, allowing more accurate data to be obtained. Machine automation is considered a crucial tool, as it optimizes process execution and increases machine autonomy with minimal human intervention. In addition, the HMI (Human-Machine User Interface) interface is presented as a complement that streamlines the operation and control of the process, while facilitating the constant monitoring of physical variables in real time. With the modifications implemented in the machine, experimental values were obtained that are close to the theoretical S-N curve of AISI 1018 steel with average errors lower than 10 % compared to the theoretical values.

**Keywords:** S-N curve, AISI 1018, Roughness, Steel fatigue, Automation

## INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo se ha demostrado que los materiales tienden a fallar cuando son sometidos a cargas cíclicas [1]. Existen varias rutas para poder analizar los materiales como: resistencia a fatiga, dureza superficial o la resistencia a la fluencia. Entender el comportamiento a fatiga presente en los materiales es de suma importancia. En la literatura se reporta que de todas las fallas mecánicas “aproximadamente el 90% son fallas por fractura” [2], de este modo se evidencia la importancia de entender la fatiga y como prevenirla.

Se ha realizado una observación de las publicaciones desde el año 2000 hasta la actualidad. Los criterios de búsqueda están relacionados con “fatiga rotativa en aceros”. Se puede evidenciar que a medida que transcurre el tiempo, los estudios sobre el comportamiento de los aceros han suscitado un creciente interés en comprender su comportamiento bajo diversas condiciones. La **Figura 1.1** muestra la tendencia en el número de publicaciones, indicando así la gran relevancia del tema de la fatiga en la actualidad.



**Figura 1.1** Número de publicaciones relativas a fatiga de materiales

El fenómeno de fatiga suscita un notable interés entre los fabricantes e industrias que incorporan materiales en sus productos. En particular, en la industria automotriz, la caracterización de los materiales utilizados en vehículos adquiere una relevancia crítica. Por ende, es imperativo comprender y evaluar minuciosamente el comportamiento de dichos materiales mediante la curva esfuerzo-número de ciclos (conocida como curva S-N). Esto posibilita la realización de análisis basados en datos experimentales y comparaciones con valores teóricos, contribuyendo significativamente al desarrollo y mejora de productos automotrices.

Este trabajo presenta un modelo de automatización y desarrollo del equipo experimental presente en la institución que nos permitirá el análisis de ensayos de fatiga a flexión rotativa rigiéndose a los lineamientos de la norma ASTM E-466 (American Society for Testing and Materials) con el fin de predecir fallos de fractura en materiales que son empleados en el mundo de la automoción.

# **CAPÍTULO I**

## **1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **1.1 OBJETIVOS**

#### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Validar resultados experimentales de resistencia de materiales a fatiga con distintas cargas y velocidades, luego de la implementación de un control automático de velocidades en la máquina de ensayos a fatiga rotativa disponible en los talleres de la carrera de Ingeniería Automotriz.

#### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar las opciones de implementación de controles automáticos para la máquina de ensayos a fatiga rotativa.
- Realizar la implementación del control automático seleccionado.
- Obtener resultados experimentales con el material utilizado en la industria automotriz, a diferentes velocidades y cargas.
- Validar los resultados experimentales obtenidos mediante comparación con información publicada en la literatura especializada.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Conforme se encuentra estipulado en el plan de creación de oportunidades el cual se encuentra vigente en el país nos regimos en el eje social, su objetivo plantea “Potenciar las capacidades de la ciudadanía y promover una educación innovadora, inclusiva y de calidad en todos los niveles”, en su política plantea “Fortalecer el Sistema Superior bajo los principios de libertad, autonomía responsable, igualdad de oportunidades, calidad y pertinencia, promoviendo la investigación de alto impacto” [3].

Los aceros presentan fallas durante su vida útil que deben ser evaluadas, una de estas fallas es conocida como “falla por fatiga”. Teniendo en cuenta esto es de suma importancia que los estudiantes de ingeniería conozcan la información del límite de resistencia de los materiales que sean sometidos a fatiga por métodos experimentales. Así, es necesario que la carrera de Ingeniería Automotriz en sus laboratorios cuente con una máquina para este propósito, cuyo funcionamiento esté automatizado.

En este proyecto se pretende implementar un control de velocidad en la máquina de fatiga rotativa que se encuentra en los talleres de la carrera de Ingeniería Automotriz de la UTN con la finalidad de obtener valores experimentales de materiales utilizados en la industria automotriz, sometidos a cargas.

Este control de velocidad permitirá al operador variar la velocidad y la carga a la que van a estar sometidos las probetas a ensayar. La importancia de tener el control de estas variables es que los ensayos a realizarse en diferentes condiciones permitan un mayor acercamiento a situaciones reales a las que van a estar sometidos los distintos materiales en el automóvil. Los resultados que se obtengan con esta implementación serán más precisos. Estos valores experimentales serán comparados con valores de materiales que se encuentran en otras investigaciones para validar la calidad del material y proceso experimental utilizado.

Este trabajo hace parte de un proyecto de investigación interno en la FICA, por lo tanto, beneficia a los docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte.

### **1.3 FATIGA**

Muchos elementos mecánicos se encuentran sometidos a cargas cíclicas. El fenómeno de rotura bajo este tipo de cargas se conoce como falla por fatiga de los materiales. Para tratar este comportamiento con objetividad, en el presente trabajo se ha utilizado normas ASTM referente a fatiga, particularmente la norma ASTM E 1150 que define la fatiga como: “El proceso de cambio estructural permanente y progresivo que se produce en un material sometido a condiciones que producen tensiones y deformaciones fluctuantes en algún punto o puntos y que pueden culminar en grietas o fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones” [4].

La idea principal en el análisis de fatiga es estudiar el comportamiento del material con sus características, analizar las tensiones y deformaciones fluctuantes conocidas como cíclicas o repetitivas. Estas se generan mediante la aplicación de una carga constante sobre un sistema rotativo para llegar al punto crítico de fatiga del material. La literatura especializada menciona que: “Cuando se llega al punto de ruptura solo se conoce las cargas (tensiones/deformaciones), fluctuantes” [5].

Los valores que se pueden obtener en los talleres de Ingeniería Automotriz de la Universidad Técnica del Norte, comparados con valores obtenidos en laboratorios certificados van a presentar discrepancias ya que existen varios factores que intervienen y modifican el límite de la resistencia del material empleado en elementos mecánicos. Lo más común es que estos factores se relacionan con: material, manufactura, entorno y diseño, este último en especial se centra en el tamaño, concentración de esfuerzos, etc. [6]

#### 1.4 RESISTENCIA A LA FATIGA DE MATERIALES

La resistencia a la fatiga es un valor del esfuerzo fluctuante necesario para llegar a un fallo en la probeta que está sometida a ensayo a fatiga después de cierto número de ciclos a carga, con el fin de llegar a construir el diagrama S-N. Es un criterio matemático donde intervienen uno o varios límites de resistencia del material, este puede presentarse por una Ecuación 1.1:

$$f(\sigma_m, \sigma_a, S_e, S_y, S_u) \leq 1 \quad [1.1]$$

Donde:

$\sigma_m$ : tensión media

$\sigma_a$ : tensión alterna

$S_e$ : límite de fatiga

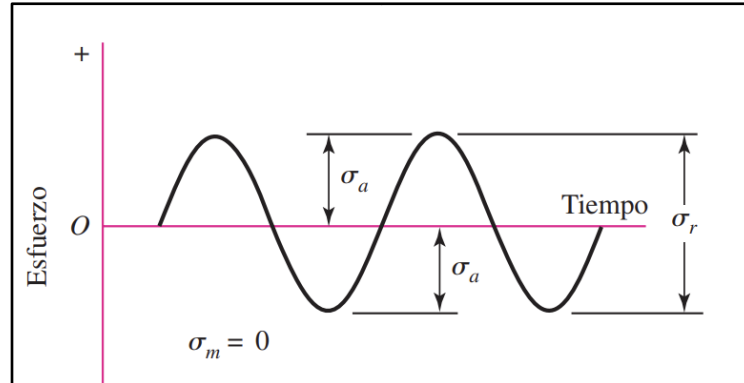
$S_y$ : límite de fluencia

$S_u$ : límite de rotura de la pieza.

Para entender de manera sencilla la resistencia a la fatiga del material se la debe comparar con la tensión alterna que es permisible para el mismo material. Esta tensión alterna se la consigue del ensayo de límite de fatiga. Se la define como “tensión máxima que puede ser aplicada sobre la

probeta normalizada para que pueda soportar infinitos ciclos de carga sin llegar a romperse” [7] con las condiciones reales del elemento el límite real de fatiga.

Representado con la siguiente **Figura 1.2**:



**Figura 1.2** Esfuerzo fluctuante sinusoidal

Mediante la **Figura 1.2** se representa la siguiente formula:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1 \quad [1.2]$$

## 1.5 RESISTENCIA A LA FATIGA

Para la resistencia a la fatiga según Budynass y Nisbett [6], se define por medio de la Ecuación 1.3. Esta para resistencia a fatiga que se encuentra en ciclos que sean menores a  $10^3$  y no mayores a  $10^6$  ya que estos valores serian considerados como vida finita del material.

$$S_f = aN^b \quad (10^3 \leq N \leq 10^6) \quad [1.3]$$

Donde los valores de a y b son representadas por las Ecuaciones 1.4 y 1.5, van asociadas con el último esfuerzo de la resistencia a fatiga.

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S_e} \quad [1.4]$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{fS_{ut}}{S_e} \right) \quad [1.5]$$

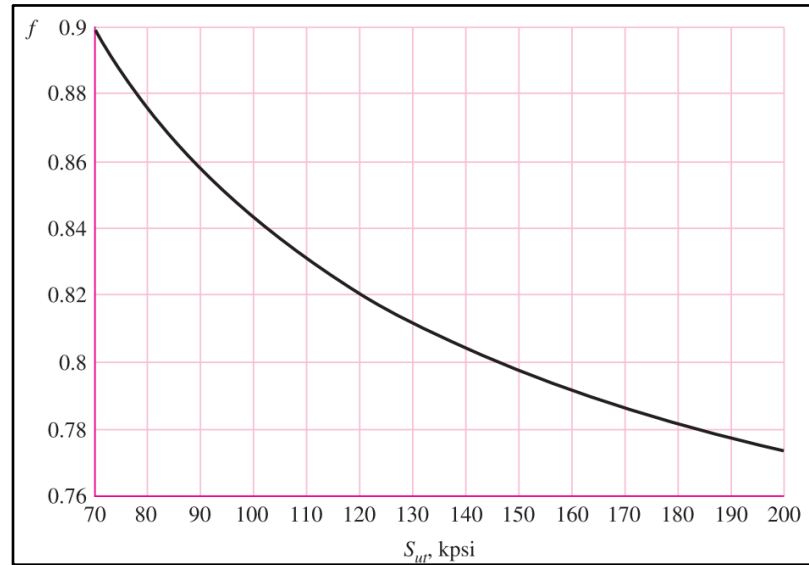
Donde:

$S_{ut}$ : Resistencia a la tracción



$f$ : Fracción de resistencia a la fatiga.

Como se ilustra en la **Figura 1.3**.



**Figura 1.3** Fracción de resistencia a la fatiga

Donde  $f$ : es un valor usado para encontrar resistencias últimas a tracción entre 70 y 200 kpsi, si el  $S_{ut}$  es menor a 70 kpsi se tomará un valor de 0,9.

Si se genera un esfuerzo completamente invertido provocando que  $S_f = \sigma_a$  en la ecuación 3, el valor de número de ciclos a falla se expresa mediante la Ecuación 1.6.

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad [1.6]$$

### 1.5.1 CRITERIO DE GOODMAN

Este criterio es utilizado para el análisis de la resistencia de las piezas que son sometidas a tensiones fluctuantes con una tensión media positiva. El criterio establece que los valores de la tensión media y la fluctuante en la zona que es analizada. Zeng et al. [8] mencionan que “A través de la combinación de TCD y la relación de Goodman, se puede lograr una resistencia a la fatiga estimada con un error de menos del 11 %” la pieza soportara siempre y cuando cumpla la Ecuación 1.7:

$$\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1 \quad [1.7]$$

Donde:

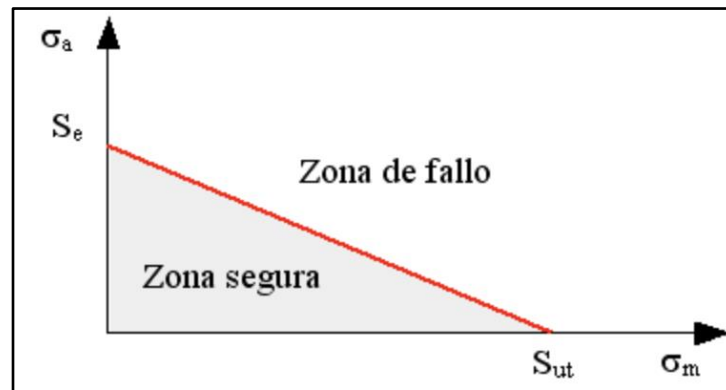
$S_e$ : límite real de fatiga.

$S_{ut}$ : límite de rotura a tracción del material.

$\sigma_m$ : tensión media.

$\sigma_a$ : tensión alterna.

De manera gráfica, **Figura 1.4**. Se representa por medio de una línea en la gráfica de tensión media con la tensión alternante. La línea generada es llamada línea de Goodman, indica el fallo.



**Figura 1.4** Criterio de Goodman

Obtenido de [9].

### 1.5.2 CRITERIO DE GOODMAN MODIFICADO

Este criterio es utilizado para analizar la resistencia de las piezas que son sometidas a cargas fluctuantes con una media de tensión positiva, este criterio se basa en dos condiciones que debe cumplir para establecer que la pieza resistirá la carga aplicada. Pelessoni et al. [10],[11] mencionan que se tiene dos eventos no triviales (no ciertos), se puede estar interesado por evaluar un evento dependiente a valores diferentes, pero cada vez más precisos. Como se presenta en las Ecuaciones 1.8 y 1.9.

$$\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1 \quad [1.8]$$

$$\frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{\sigma_a}{S_y} \leq 1 \quad [1.9]$$

Donde:

$S_e$ : límite real de fatiga

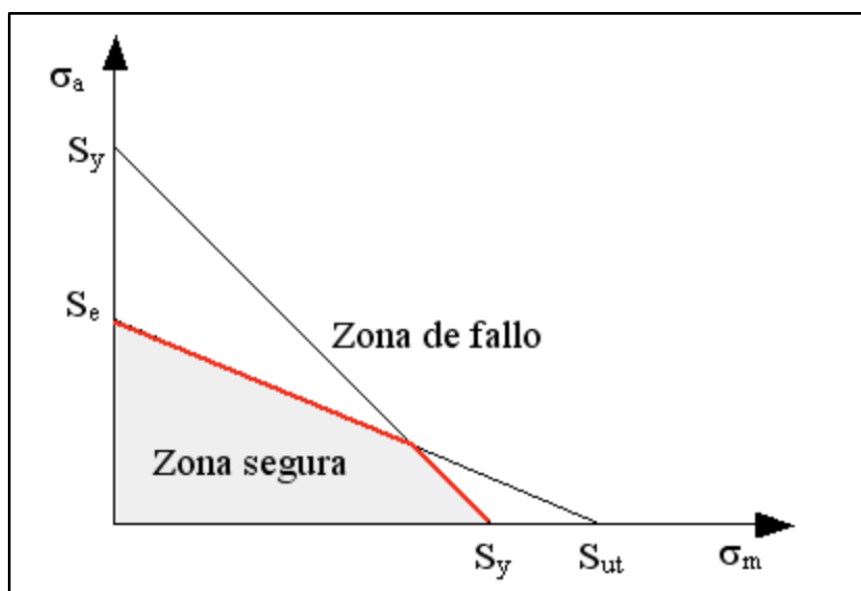
$S_{ut}$ : límite de rotura a tracción del material

$S_y$ : límite de fluencia.

$\sigma_m$ : tensión media

$\sigma_a$ : tensión alterna

Esta condición se diferencia con el criterio de Goodman ya que establece que la suma de las componentes medias y alternas no deben superar el límite de fluencia. En la **Figura 1.5** se representa la tensión media con la tensión alterna. Para las tensiones con un valor elevado coinciden con el criterio de Goodman, por otra parte, las tensiones con valores bajos se lo analizan con la segunda ecuación que es representada por la línea de fluencia [10]. Los autores [12] mencionan que “El límite de fatiga de materiales metálicos modificados puede ser estimado por medio del criterio de Goodman modificado, porque la tensión residual puede ser considerada como tensión media durante el proceso de fatiga”.



**Figura 1.5** Criterio de Goodman modificado en las zonas de fallo y segura

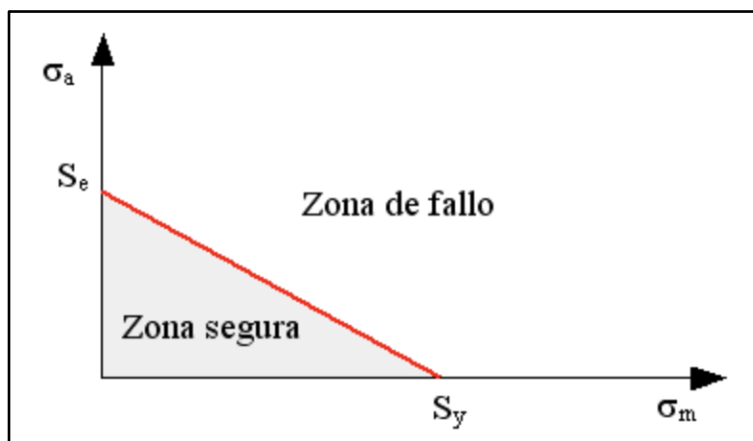
Obtenido de [13].

### 1.5.3 CRITERIO DE SODERBERG

Este criterio es utilizado para analizar la resistencia de las piezas que son sometidas a cargas fluctuantes con una tensión media positiva. Se establece que la pieza resistirá siempre y cuando cumpla la condición mostrada en la Ecuación 1.10.

$$\frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1 \quad [1.10]$$

La curva de Soderberg ayuda a revelar la zona segura, si la probeta soporta bajas cargas cíclicas significa que el elemento lograría soportar la máxima vida útil a fatiga sin presentar daños [14]. Los autores [15],[16] reportan que esta curva es desarrollada desde las propiedades de fatiga que vienen relacionadas con el metal base y con las diferentes relación de tensión.



**Figura 1.6 Criterio de Soderberg**

Obtenido de [17].

De manera gráfica el criterio de Soderberg se representa por una línea recta en la gráfica de tensión media y tensión alterna tal como muestra la **Figura 1.6**. La línea de Soderberg determina la frontera de fallo.

#### 1.5.4 CRITERIO DE GERBER

Este criterio es utilizado para analizar la resistencia de las piezas que son sometidas a cargas fluctuantes con una tensión media positiva. Este criterio se basa en los valores de tensión media  $\sigma_m$  y alterna  $\sigma_a$ . Los autores [18] informan que para obtener una relación más reducida de los valores de fatiga es recomendable emplear el método de Gerber para la corrección de tensión media. Badr y Ishak [19] propusieron que la parábola de Gerber tiende por debajo de la curva debido a la cuadratura ( $n = 2$ ), esta solo se conserva en el rango de tensión media a compresión. Las ecuaciones establecen que la pieza resistirá siempre y cuando cumpla con la condición propuesta en la Ecuación 1.11.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 \leq 1 \quad [1.11]$$

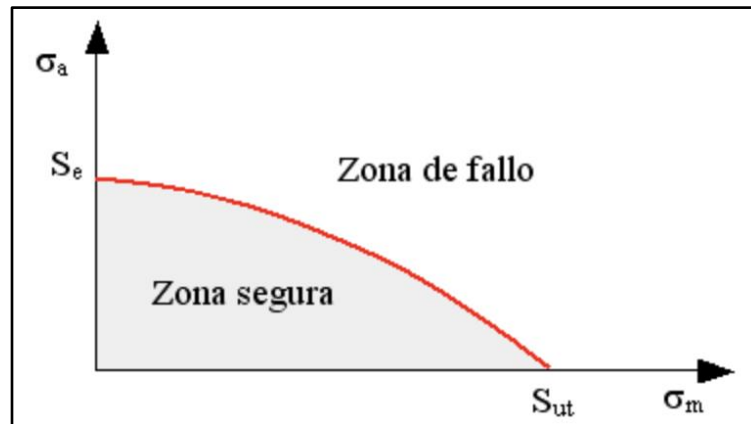
Donde:

$S_e$ : límite de la fatiga real

$S_{ut}$ : límite de rotura de tracción del material.

$\sigma_m$ : tensión media.

$\sigma_a$ : tensión alterna.



**Figura 1.7** Zona de fallo y segura del criterio de Gerber

Obtenido de [20].

En la **Figura 1.7** este criterio se representa por medio de una parábola en el gráfico de tensión media y alterna, la parábola de Gerber determina la frontera de fallo.

Cuando la tensión es negativa o de compresión el criterio de estudio se explica a continuación.

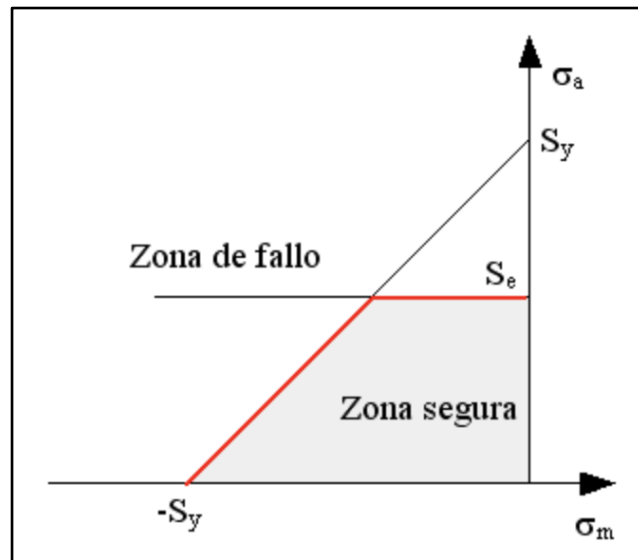
### 1.5.5 CRITERIO DE RESISTENCIA A FATIGA PARA TENSIONES MEDIAS NEGATIVAS

Este criterio es utilizado para analizar la resistencia de piezas que son sometidas a cargas fluctuantes con una tensión media negativa. El fundamento de este criterio se basa en dos condiciones que permiten predecir el fallo del material. Las condiciones utilizadas se muestran en las Ecuaciones 1.12 y 1.13.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1 \quad [1.12]$$

$$\frac{\sigma_a}{S_y} - \frac{\sigma_m}{S_y} \leq 1 \quad [1.13]$$

La Ecuación 1.13 o primera condición establece que la tensión alterna no debe superar el límite real de fatiga del material, por otra parte, la Ecuación 1.12 o segunda condición establece que la tensión total máxima, que es la suma de la componente alterna con la componente media, no debe superar el límite a la fluencia.



**Figura 1.8** Zonas de fallo y seguras

Obtenido de [21].

De manera gráfica la **Figura 1.8** este criterio es representado por una línea quebrada. La línea representa la frontera de fallo.

## 1.6 LÍMITE DE RESISTENCIA A FATIGA

El límite de resistencia a la fatiga depende además de los criterios revisados previamente, de factores ambientales y de aplicación del elemento mecánico. Estos factores de modificación reflejan las diferencias entre las condiciones experimentales de la probeta con la parte real de sollicitación del elemento mecánico. La influencia de estos factores es clásicamente atribuida a MARIN y su efecto se muestra en la ecuación de límite a fatiga Ecuación 1.14.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d k_e \cdot k_f \cdot S'_e \quad [1.14]$$

Donde:

$S_e$ : Límite de fatiga

$k_a$ : Factor de condición superficial

$k_b$ : Factor de tamaño

$k_c$ : Factor de carga

$k_d$ : Factor de temperatura

$k_e$ : Factor de confiabilidad

$k_f$ : Factor de varios efectos

$S'_e$ : Límite de resistencia a fatiga

### 1.6.1 FACTOR DE CONDICIÓN SUPERFICIAL ( $k_a$ )

Este factor de superficie depende del terminado de la superficie del material, la probeta usada para los ensayos de fatiga rotativa presenta una superficie pulida en terminado tipo espejo en sentido axial con la finalidad de reducir rayaduras del proceso de torneado, evitando los concentradores de tensión, representada mediante la siguiente expresión Ecuación 1.15.

$$k_a = a * S_{ut}^b \quad [1.15]$$

Donde los valores de a y b se obtienen de la **Tabla 1.1**.

**Tabla 1.1** Factor de condición superficial

<b>Factor a</b>			
<b>Acabado superficial</b>	<b><math>S_{ut}, kpsi</math></b>	<b><math>S_{ut}, MPa</math></b>	<b>Exponente b</b>
<b>Esmerilado</b>	1.34	1.58	-0.085
<b>Maquinado o laminado en frío</b>	2.70	4.51	-0.265
<b>Laminado en caliente</b>	14.4	57.7	-0,718
<b>Como sale de la forja</b>	39.9	272	-0.995

### 1.6.2 FACTOR DE TAMAÑO ( $k_b$ )

Al realizar ensayos en la máquina existente, las dimensiones de la pieza en forma y diámetro cambian a las de la probeta normalizada, el factor de tamaño es el encargado de corregir estas

variaciones. Para valores diferentes diámetros de las piezas a ensayar el factor de tamaño se calcula por medio de la expresión Ecuación 1.16.

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0,107} = 0.879d^{-0,107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0,157} & 2 \leq d \leq 10 \text{ in} \\ 1.24d^{-0,107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0,157} & 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad [1.16]$$

Para el caso de probetas que no presentan diferencia en el diámetro específico normalizado (2 pulgadas) este factor se encuentra vinculado al valor de la carga axial expresada por la siguiente expresión Ecuación 1.17.

$$K_b = 1 \quad [1.17]$$

### 1.6.3 FACTOR DE CARGA ( $k_c$ )

Los valores del factor de carga se seleccionan de medio de la Ecuación 1.18.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torsión} \end{cases} \quad [1.18]$$

En este caso como la aplicación de carga es en forma de flexión el valor de  $k_c$  se toma el valor estipulado por la Ecuación 1.19.

$$K_c = 1 \quad [1.19]$$

### 1.6.4 FACTOR DE TEMPERATURA ( $k_d$ )

La resistencia a la fatiga de los materiales también depende de la temperatura, si el valor de la resistencia a la tensión a temperatura es conocido se calcula mediante la Ecuación 1.20.

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad [1.20]$$

Los valores del factor de temperatura se encuentran en la **Tabla 1.2**.



**Tabla 1.2** Factor de temperatura

<b>Factor de temperatura</b>			
<b>Temperatura °C</b>	$\frac{S_T}{S_{RT}}$	<b>Temperatura °F</b>	$\frac{S_T}{S_{RT}}$
<b>20</b>	1.000	70	1.000
<b>50</b>	1.010	100	1.008
<b>100</b>	1.020	200	1.020
<b>150</b>	1.025	300	1.024
<b>200</b>	1.020	400	1.018
<b>250</b>	1.000	500	0.995
<b>300</b>	0.975	600	0.963
<b>350</b>	0.943	700	0.927
<b>400</b>	0.900	800	0.872
<b>450</b>	0.843	900	0.797
<b>500</b>	0.768	1000	0.698
<b>550</b>	0.672	1100	0.567
<b>600</b>	0.549		

Si el valor de la temperatura máxima no es conocido para poder conocer el esfuerzo a tensión se interpreta con el valor de 1.0, como se muestra en la Ecuación 1.21.

$$k_d = 1 \quad [1.21]$$

### 1.6.5 FACTOR DE CONFIABILIDAD ( $k_e$ )

Las partes en ingeniería con frecuencia experimentan fallas por fatiga cuando estos son sometidos a tensiones repetitivas por un periodo de tiempo [22],[6]. Los valores del factor de carga a fatiga son valores de un fenómeno estadístico, existe varios valores que se obtienen de la aplicación experimental por tal motivo es necesario un factor de confiabilidad. Se toma en cuenta la desviación estándar de resistencia a fatiga debe ser menor al 8%. De tal modo el factor de confiabilidad esta dado por la Ecuación 1.22.

$$k_e = 1 - 0.08z_\alpha \quad [1.22]$$

Donde el valor de confiabilidad se encuentra en la **Tabla 1.3**.

**Tabla 1.3** Factor de confiabilidad

Factor de confiabilidad		
Confiabilidad %	Variación $z_\alpha$	Factor de confiabilidad
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

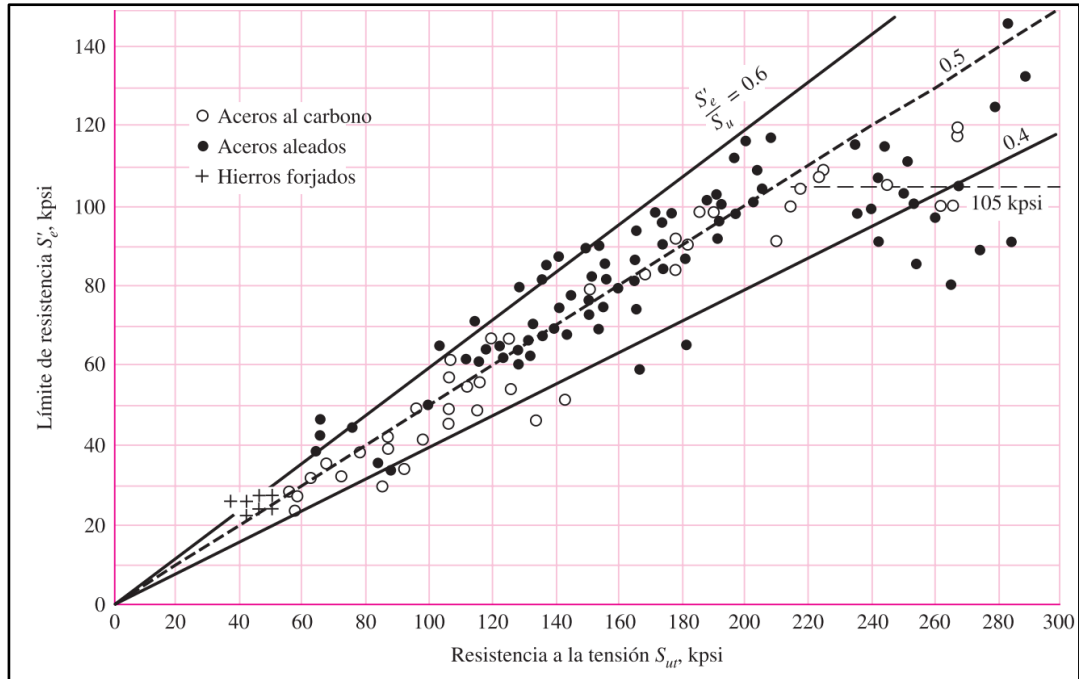
El valor del factor de confiabilidad que sea escogido debe tener la probabilidad que la probeta supere la resistencia. Mientras mayor sea el valor de confiabilidad, menor es la resistencia a la fatiga.

### 1.6.6 FACTOR DE VARIOS EFECTOS ( $k_f$ )

El factor de varios efectos depende de las condiciones a las que el material se encuentra expuesto ya sea la corrosión, recubrimientos, metalizado, etc [23],[6]. Tiene la finalidad de considerar algunos factores que reducen el límite de resistencia a fatiga.

### 1.6.7 LÍMITE DE RESISTENCIA A LA FATIGA ( $S'_e$ )

Es necesario conocer el límite de resistencia a la fatiga de forma rápida. Existe extensa información con datos acerca de este valor, como se indica en la **Figura 1.9**. Se aprecia que existe una correlación entre los resultados que se obtuvieron en ensayos de viga rotativa y ensayos de tensión simple.



**Figura 1.9** Límite de resistencia a la fatiga

Obtenido de [6].

El límite de resistencia a fatiga tiene relación determinada de una forma experimental con el esfuerzo último de tensión, para aceros está se encuentra definida por medio de la Ecuación 1.23.

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi} (1400 \text{ MPa}) \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad [1.23]$$

Donde:

$S'_e$ : Límite de resistencia a la fatiga

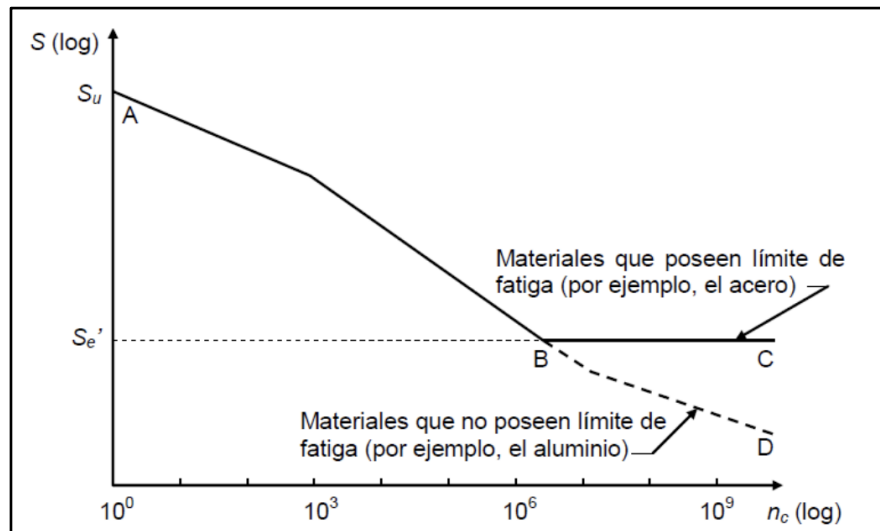
$S_{ut}$ : Resistencia a la tracción

Es importante entender que el valor de esta variable es válida para ensayos en laboratorio, dado que existen otros factores externos intervienen y como al ser una valor estadístico es muy complicado tener valores exactos, para tener ese valor sería necesario una gran cantidad de probetas a ensayar [24].

## 1.7 DIAGRAMA DE WÖHLER

El diagrama de Wöhler también se conocido como diagrama S-N (Stress-Number) este representa los niveles de esfuerzo a los que se someten las probetas con el número de ciclos de carga hasta que el material llega a su ruptura en la máxima tensión. Esfuerzo (S) representada en el eje de las ordenadas se encuentra la tensión máxima la cual produce la rotura por fatiga, por otra el número de ciclos (N) representada en el eje de las abscisas es la duración de ciclos esta suele estar representada en función de  $\log N$  en lugar de N. Valores que se obtiene después de someter a ensayos un número de probetas para poder determinar el número de ciclos.

La línea en el diagrama representa la tendencia estadística descrita por de los datos experimentales de falla que son obtenidos en los ensayos [25].



**Figura 1.10** Diagrama de Wöhler

Obtenido de [6].

En la **Figura 1.10** se puede observar dos curvas, la que conforma un número bajo de ciclos aplicados denominada como fatiga oligocíclica y la de bajo nivel de tensión aplicada denominada como fatiga multicíclica [26].

De acuerdo con el análisis de la curva se estima el número de ciclos que soporta la probeta antes de fallar y esta aumenta al disminuir el esfuerzo aplicado. En algunos materiales como el acero, ferroso estos presentan una línea horizontal a un valor constante conocido como límite de

fatiga o límite de resistencia, es un valor por debajo del que presuntamente el material durará números ciclos infinitos sin llegar a la fractura [27]. Materiales no ferrosos como el cobre, aluminio entre otros estos presentan curvas decrecientes lo que se interpreta como que no existe un valor real del límite de fatiga [28]. Por este motivo la resistencia a fatiga para este tipo de materiales se tomará por debajo de esta tendencia para representar número de ciclos infinitos.

## **1.8 REGÍMENES DE FATIGA**

A través del diagrama S-N se evidencian diferentes tipos de comportamiento que representan el valor del esfuerzo que puede lograr resistir el material a medida que el número de ciclos aumenta hasta llegar al fallo. Los autores [29] investigaron que la falla por fatiga es gradual, definido al número de ciclos soportados por la estructura. Provocando fatiga de forma axial, transversal, torsión y en algunos casos, de manera combinada [30]. Los dos regímenes son fatiga a bajo ciclos, estos normalmente se caracterizan por ser menores de  $10^3$  ciclos de esfuerzo y fatiga de altos ciclos son mayores de  $10^3$  pero inferiores de  $10^6$  ciclos de esfuerzo.

Los daños por fatiga combinan teorías estadísticas con la curva de tensión/vida, resultados obtenidos experimentalmente o por modelos teóricos [31]. Por tal motivo, las investigaciones [32],[33] llegan a la conclusión que es importante comprender como se propaga la grieta por fatiga.

### **1.8.1 FATIGA A BAJO CICLAJE**

La fatiga de bajos ciclos abreviada como LCF (Low Cycle Fatigue) es la falla bajo cualquier carga que se encuentre por debajo de los 1000 ciclos esta puede ser considerada como una carga estática o una carga común. Las investigaciones revisadas [34] mencionan que el comportamiento de estrés y deformación está presente en los regímenes de LCF. Por lo tanto, predecir la vida útil de fatiga a bajo ciclaje es importante para un diseño estructural y la confiabilidad del material. En los regímenes de bajo ciclaje los elementos mecánicos experimentan fuerzas de tensión y deformación que dependen de la geometría del material, el modo de carga aplicada entre otros factores.

### **1.8.2 FATIGA A ALTO CICLAJE**

La fatiga a alto ciclaje abreviada como HCF (High Cycle Fatigue) varios de los elementos mecánicos durante su vida útil se encuentran entre regímenes de  $10^3$  a  $10^6$  ciclos considerados

como vida finita, a partir de  $10^7$  a  $10^{10}$  ciclos se considera como fatiga de ciclaje muy alto abreviada como VHCF (Very High Cycle Fatigue) considerado como vida infinita. W. Li et al. [35] concluyeron que la falla por fatiga a HCF tiende a presentar una vida útil mayor por las elevadas temperaturas. Los autores [36], [37] investigaron que los defectos, fallas y debilidades internas del material son los que llevan al fallo por fatiga. Por lo tanto, en la curva S-N se observa que la resistencia a fatiga presenta una función lineal.

## 1.9 RUGOSIDAD

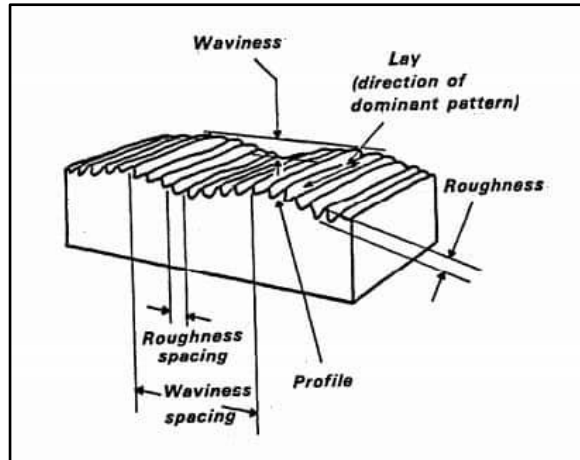
La rugosidad en los aceros es medida mediante el acabado superficial a la pieza este proceso hace referencia a la textura, forma y otras propiedades del objeto. También se puede describir cual fue el proceso tratado sobre la superficie del objeto como el maquinado, esmerilado o lijado. Las superficies deben mantenerse en los límites de rugosidad con el fin de garantizar una buena pieza, el acabado superficial es un tema sumamente importante en la durabilidad, rendimiento, términos de fricción, desgaste entre otros [38].

Las superficies más ásperas frecuentemente son las que fallan por desgaste dado que su superficie de fricción es más elevada que las superficies lisas, estas irregularidades crean puntos de concentradores que producen la ruptura y el desgaste con mayor facilidad. Zhu et al. [39] informaron que para la evaluación de resistencia a fatiga de los componentes mecánicos se consideran los defectos e heterogeneidad del material. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que se debe considerar las condiciones de acabado de la superficie en todos los cálculos e interpretaciones.

### 1.9.1 ACABADO SUPERFICIAL

El acabado o terminado superficial es el que describe la textura, forma y otras propiedades superficiales del material del elemento analizado como se muestra en la **Figura 1.11**. Es un indicador de la calidad superficial que se define por tres características:

- Ondulación
- Rugosidad de la superficie
- Geométricos



**Figura 1.11 Acabado superficial**


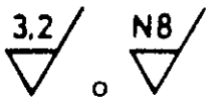
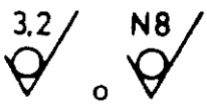
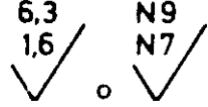
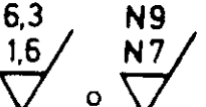
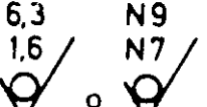
Obtenido de [40].

- *Ondulación*: Este es el resultado de la flexión a la que es sometida la pieza durante el proceso de mecanizado, vibraciones, falta de homogeneidad del material. Hace referencia a la superficie que presenta un mayor espaciado que la distancia de rugosidad de la superficie.
- *Rugosidad de la superficie*: Son las irregularidades de espaciado total de la superficie consecuencia de la herramienta de corte. Mientras menor sea el valor de rugosidad, menor será la irregularidad de la superficie.
- *Geométricos*: Producidos por la deformación de bancada del torno, indica la dirección que va a seguir el patrón sobre la superficie predominante. Según sea el método de fabricación el proceso define la disposición para la superficie.

## 1.9.2 TABLA E INDICACIONES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Los acabados superficiales se representan con símbolos sobre las superficies mecanizadas junto con unidades que son usadas para medir el terminado superficial del objeto como se muestra en la **Tabla 1.4**.

**Tabla 1.4** Simbología de rugosidad

SIMBOLOGÍA			SIGNIFICADO
Arranque de viruta			
Voluntario	Obligatorio	Prohibido	
			Rugosidad superficial (Ra) máxima de 3,2 $\mu$
			Rugosidad superficial (Ra) máxima de 6,3 $\mu$ y mínima de 1,6 $\mu$

Con los valores conocidos de rugosidad Ra, la **Tabla 1.5** muestra las conversiones de acabado superficial comparada con las escalas de rugosidad superficial de los procesos de mecanizado.

**Tabla 1.5** Tabla de rugosidad

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu$ )	N
0.025	0.3	1
0.05	0.5	2
0.1	0.8	3
0.2	1.2	4
0.4	2.0	5
0.8	4.0	6
1.8	8.0	7
3.2	13	8
6.3	25	9
12.5	50	10
25.0	100	11
50.0	200	12

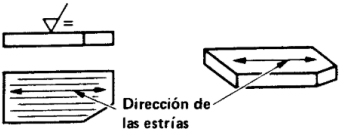
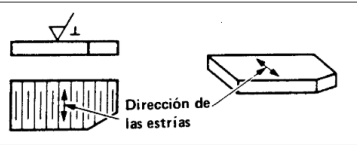
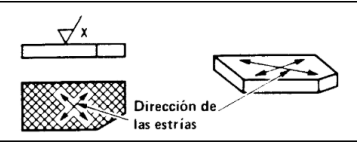
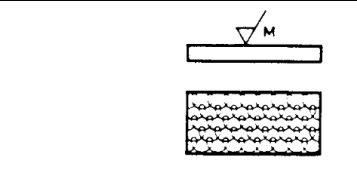
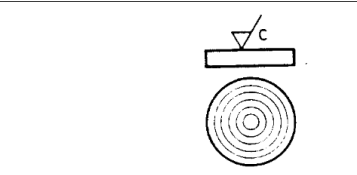
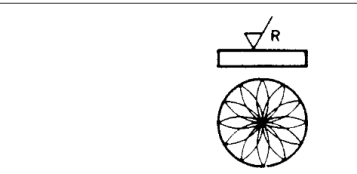
Donde:

- **Ra ( $\mu\text{m}$ ):** Valor de rugosidad medida en micrómetros
- **Rt ( $\mu$ ):** Valor de rugosidad total medida en micras
- **N:** Clase de rugosidad



Los acabados superficiales exhiben diferentes tipos de direcciones de estrías, las cuales se simbolizan para identificar cada tipo de acabados superficiales. Estas estrías pueden ser horizontales, verticales o diagonales, y su orientación puede influir en la apariencia y las propiedades funcionales de la superficie. Es importante comprender y controlar estas direcciones para garantizar la calidad y la eficacia de los productos manufacturados, especialmente donde la rugosidad superficial crítica como en componentes mecánicos o superficies de contacto.

**Tabla 1.6** Dirección de estrías

Símbolo	Interpretación	
=	Paralelas al plano de proyección de la vista sobre la cual se aplica el símbolo	
⊥	Perpendiculares al plano de proyección de la vista sobre la cual se aplica el símbolo	
X	Cruzadas en dos direcciones oblicuas con respecto al plano de proyección de la vista sobre la que se aplica el símbolo	
M	Multidireccional	
C	Aproximadamente circular con relación al centro de la superficie a la cual se aplica el símbolo	
R	Aproximadamente radial con respecto al centro de la superficie sobre la cual se aplica el símbolo	

Obtenida de [41]

La dirección de las estrías se muestra en la **Tabla 1.6**, donde cada símbolo representa una orientación específica de las estrías en la superficie. Estos símbolos son utilizados para comunicar

claramente la dirección de las estrías en dibujos técnicos y especificaciones de acabados superficiales.

## **1.10 AUTOMATIZACIÓN**

Automatización puede entenderse como una ingeniería de procesos, tanto internos como externos para la organización, que pretende la eliminación de tiempos de espera o tareas innecesarias; vinculado a un flujo de trabajo, en el cual la información o la tarea pasa de un punto al siguiente de acuerdo con un procedimiento establecido y controlado por un sistema de información [42].

La automatización de las operaciones de una máquina ayuda a obtener mejores resultados en calidad y costos. Libera al ser humano de las tareas tediosas y peligrosas, para cumplir con este objetivo se debe tener la certeza que dicha implementación resultará favorable lo cual se proyecta mediante la simulación de los diseños de programación en software aplicados a los procesos que intervienen en el funcionamiento de la máquina demostrando así una mejor eficacia en la capacidad de respuesta [43].

Para realizar la automatización de una máquina, se necesita de ciertos componentes y dispositivos que se instalan con el fin de alcanzar el control autónomo de la misma.

### **1.10.1 SENSORES**

En la actualidad estamos rodeados de todo tipo de sensores que se encuentran ya sea en los electrodomésticos, así como en el campo de la industria. Su crecimiento es exponencial ya que estos permiten el desarrollo de nuevas tecnologías.

Un sensor es un convertidor técnico, que convierte una variable física (como puede ser distancia, temperatura, etc.) en otra variable diferente, la cual puede ser fácilmente evaluable, normalmente suele ser una señal eléctrica, pero puede ser de otro tipo como neumática. Se puede encontrar con varios términos para “sensor” encoder, transmisor, detector, transductor e incluso emisor [44].

### **1.10.2 CONTROLADOR**

Un sistema controlador se encarga del control de procesos y trabajos determinados que realiza una máquina, esto se lo hace mediante procesos de programación en la máquina, los cuales van a estar basados en soluciones óptimas dentro de los procesos.

La programación del sistema controlados implica la configuración de parámetro específicos, como velocidades, tiempos de operación y secuencias de trabajo para optimizar la eficiencia y la precisión de la máquina, además el sistema controlador monitorea continuamente el desempeño de la máquina.

### **1.10.3 PLC (CONTROL LÓGICO PROGRAMABLE)**

Los controladores lógicos programables (PLC) proporcionan un ecosistema de lógica de software relativamente simple, hardware robusto y resistente, redes con comportamientos controlables en tiempo real y amplia disponibilidad de componentes interoperables como sensores y actuadores. Los PLC son una plataforma establecida para la automatización y diseño de procesos industriales. La plataforma incluye un estilo de programación, estilo de red e interconexiones físicas, cada uno de los cuales permite la composición de componentes en sistemas de automatización complejos con comportamiento predecible [45].

En otras palabras, un PLC es un dispositivo electrónico que tiene como finalidad adaptarse a la necesidad de una máquina por medio de la programación, para de esta manera tener el control de los procesos y acciones que realiza la misma, de modo que sea una máquina más segura y eficiente.

### **1.10.4 HMI (HUMAN MACHINE INTERFACE)**

HMI significado de sus abreviaturas en español Interfaz Hombre-Máquina. Son elementos de software (gráficos, lógica de programación) y hardware (dispositivos de visualización, switches, entre otros), que permiten al operario y la máquina interactuar y facilitar la comunicación con el sistema de control [46].

Este componente permite mostrar información de los procesos de la máquina en tiempo real para que el operador pueda controlar, monitorear y supervisar parámetros que intervienen en un determinado proceso de forma apropiada y eficiente [47].

## **1.11 TIPOS DE CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES DE INDUCCIÓN**

Los controles de velocidad son dispositivos que permiten variar la velocidad de un motor durante su operación de giro. Existen diferentes métodos para poder controlar la velocidad de un motor de inducción:

### **1.11.1 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DE POLOS**

Es uno de los principales métodos que modifica la velocidad de sincronismo y permite tener un motor de varias velocidades alterando las conexiones de las bobinas, pero su construcción es complicada y de elevado precio, por lo que se suele limitar a dos velocidades [48].

Este método es utilizado principalmente en motores de jaula de ardilla, ya que no es necesario alterar el número de polos del rotor al modificar el circuito del estator, esto debido a que este motor desarrolla automáticamente una cantidad de polos que va a ser igual a los polos del devanado del estator.

### **1.11.2 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE VARIADOR DE FRECUENCIA DE ALIMENTACIÓN**

En los motores asíncronos de corriente alterna AC la velocidad de giro no depende de la tensión de alimentación sino de la frecuencia de la red. Los variadores de frecuencia (velocidad), tienen como misión variar la frecuencia de la corriente de alimentación. El variador de frecuencia permite la variación de velocidad desde 0 rpm a la velocidad nominal del motor a par constante [49].

Según [50] un variador de frecuencia es una fuente independiente, para esto se utiliza un motor de inducción de rotor trifásico bobinado accionado por otro motor de inducción en sentido contrario al del campo giratorio. La frecuencia de las tensiones inducidas en el rotor serán la suma

de las frecuencias de alimentación de dicho motor más la frecuencia impuesta por el motor de accionamiento.

### **1.11.3 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE MODIFICACIÓN DEL DESLIZAMIENTO**

El autor [48] menciona que este procedimiento puede ser variando la tensión de alimentación del estator, variando la resistencia del circuito rotórico mediante un reóstato, o por inyección de una fuerza electromotriz en el rotor utilizando otra máquina eléctrica. Estos dos últimos métodos solo son aplicables en motores de rotor bobinado.

Este método se basa en el hecho de que, en un motor asíncrono, la potencia electromagnética procedente del estator se transmite al rotor a través del entrehierro (potencia del campo giratorio) y la potencia disipada como pérdidas Joule en los devanados del rotor [51]. Esto quiere decir todo incremento del deslizamiento implica automáticamente mayores pérdidas térmicas en los devanados cerrados del rotor.

### **1.11.4 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE CAMBIO DE VOLTAJE DE LÍNEA**

El par del motor de inducción bajo condiciones de arranque y de marcha varían con el cuadrado del voltaje aplicado al primario del estator. Para una carga determinada, reduciendo el voltaje de línea se reducirá el par con el cuadrado del voltaje de línea y la reducción del par producirá un incremento de deslizamiento. Aunque reducir el voltaje de línea y el par como método de incrementar el deslizamiento servirá solo para controlar hasta cierto grado en motores monofásicos de fase partida particularmente, y en motores de inducción pequeños [52].

## **1.12 MÉTODOS DE CONTROL MODERNOS**

Estos métodos controlan el funcionamiento del motor modificando la alimentación eléctrica mediante un convertidor de potencia, el cual permite ajustar tanto la tensión como la frecuencia suministrada.

El control escalar se basa en el control del voltaje y la frecuencia (V/f). Las variables son controladas en magnitud y este control se basa en el desempeño en estado estacionario del motor. Este método tiene una gran aceptación en la industria [53].

### **1.12.1.1 Control escalar**

El método (V/f) consiste en mantener una relación constante a medida que varían la frecuencia para regular la velocidad de giro. Al modificar la frecuencia de alimentación, se varía la frecuencia de sincronismo del motor, por lo que para un mismo par la velocidad de giro será diferente. Este control se enfoca en conseguir la regulación de la velocidad del motor a través de la variación de la frecuencia de alimentación [48].

### **1.12.1.2 Control vectorial**

El autor [54] menciona que “El control vectorial se basa en la transformación de las ecuaciones que constituyen el modelo del motor, debido a que son ecuaciones no lineales y dinámicas, por medio de la presentación vectorial de espacios de estado de la máquina, consiguiendo así controlar de forma independiente el torque y el flujo de corriente como una máquina de excitación separada”. Esto se realiza a través de la manipulación de las corrientes del estator: una genera el par y otra el flujo.

De esta forma el control se ajusta a la representación vectorial, que garantiza una correcta orientación para los estados: estable y transitorio de la máquina, ganando de este modo el control más preciso de par y velocidad.

## **1.13 NORMAS APLICADAS PARA ENSAYOS A FATIGA**

Los ensayos a fatiga se deben realizar bajo normativas en las cuales se imponen estándares que establecen el procedimiento, características y condiciones que se deben cumplir para realizar los ensayos en el material, para de esta manera obtener buenos resultados.

Estas normativas están diseñadas para garantizar la validez de los resultados obtenidos, las normas ASTM proporcionan directrices detalladas sobre cómo realizar ensayos de fatiga en diferentes materiales, incluyendo aleaciones metálicas, polímeros y materiales compuestos.

Cumplir con estas normativas asegura que los ensayos se realicen de manera precisa y consistente, lo que a su vez permite obtener datos confiables sobre la resistencia y durabilidad del material frente a cargas cíclicas.

### 1.13.1 NORMA ASTM E466

Esta norma define el procedimiento para realizar ensayos a fatiga por fuerza axial para determinar el efecto de las variaciones en el material. Obtener la resistencia a fatiga de los materiales metálicos tanto en la carga inicial como en altos ciclos de fatiga antes de que el material presente deformaciones o un fallo visible [55].

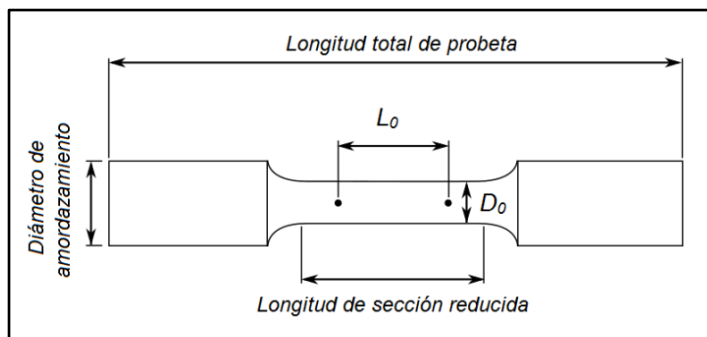
### 1.13.2 NORMA ASTM E606

Esta norma establece las propiedades de fatiga de materiales nominalmente homogéneos utilizando probetas que son sometidas a fuerzas uniaxiales. Este método está diseñado principalmente para pruebas de fatiga controladas por deformación que impone requisitos distintivos en la prueba de fatiga. En particular, debe medirse la deformación total cíclica y debe determinarse la deformación plástica cíclica [56].

Este procedimiento es importante para situaciones en las que los componentes o partes de los componentes experimentan deformaciones plásticas cíclicas inducidas mecánica o térmicamente que causan fallas en relativamente pocos ciclos. La norma UNE 7118 regida a nivel nacional establece las clases de ejecución de ensayo a fatiga de los materiales metálicos.

## 1.14 PROBETAS

Una probeta es una muestra de un determinado material, la cual va a estar sometida a una serie de pruebas y ensayos para conocer sus características que se desean estudiar. Generalmente las probetas se construyen bajo procedimientos y con dimensiones que son basados en normativas.



**Figura 1.12** Dimensiones características de la probeta  
Obtenido de [57].

La **Figura 1.12** muestra el plano de la probeta que serán sometidas a ensayos a fatiga de acuerdo con la normativa ASTM. En este ensayo la probeta se somete a cargas cíclicas controladas para evaluar su resistencia y comportamiento frente a condiciones de fatiga.

#### 1.14.1 ASTM A370

Esta norma se utiliza para medir la resistencia de una probeta sometido a una carga, el procedimiento consiste en alargar una probeta de ensayo por fuerza de tensión, con el objetivo de conocer propiedades mecánicas del material.

### 1.15 MATERIAL DE ENSAYO: ACERO AISI 1018

Este acero es de bajo-medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para elaboración de componentes dentro de la industria automotriz y maquinaria.

**Tabla 1.7** Propiedades del acero AISI 1018

<b>Dureza</b>	126 HB (71 HRb)
<b>Esfuerzo de fluencia</b>	205 – 440 MPa
<b>Esfuerzo máximo</b>	20 %
<b>Elongación máxima</b>	20 %
<b>Reducción de área</b>	40 %
<b>Módulo de elasticidad</b>	205 GPa (29700 KSI)
<b>Maquinabilidad</b>	75%

Obtenida de [58].

En la **Tabla 1.7** se presenta las propiedades mecánicas del acero AISI 1018. Estas propiedades incluyen características importantes que son fundamentales para entender el comportamiento y la aplicación de este tipo de acero en la industria automotriz.



## **CAPÍTULO II**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **2.1 METODOLOGÍA**

El presente trabajo se llevará a cabo mediante metodología de campo y método analítico, este comprende desglosar la problemática existente. En contexto se pretende realizar la automatización de la máquina en general. Además, se contempla rediseñar ciertos sistemas que no tiene funcionalidad eficiente. Para así, reducir errores en la obtención de datos en las probetas a experimentar.

##### **2.1.1 ETAPAS DE METODOLOGÍA**

###### **2.1.1.1 Etapa 1**

En el desarrollo de este trabajo, se busca comprender la problemática actual que debe ser corregida. Se indaga información relacionada con el trabajo de investigación, abarcando información tanto para el problema como posibles soluciones. Después de examinar los fundamentos teóricos para tener un punto de inicio, se plantean posibles soluciones a la necesidad existente.

###### **2.1.1.2 Etapa 2**

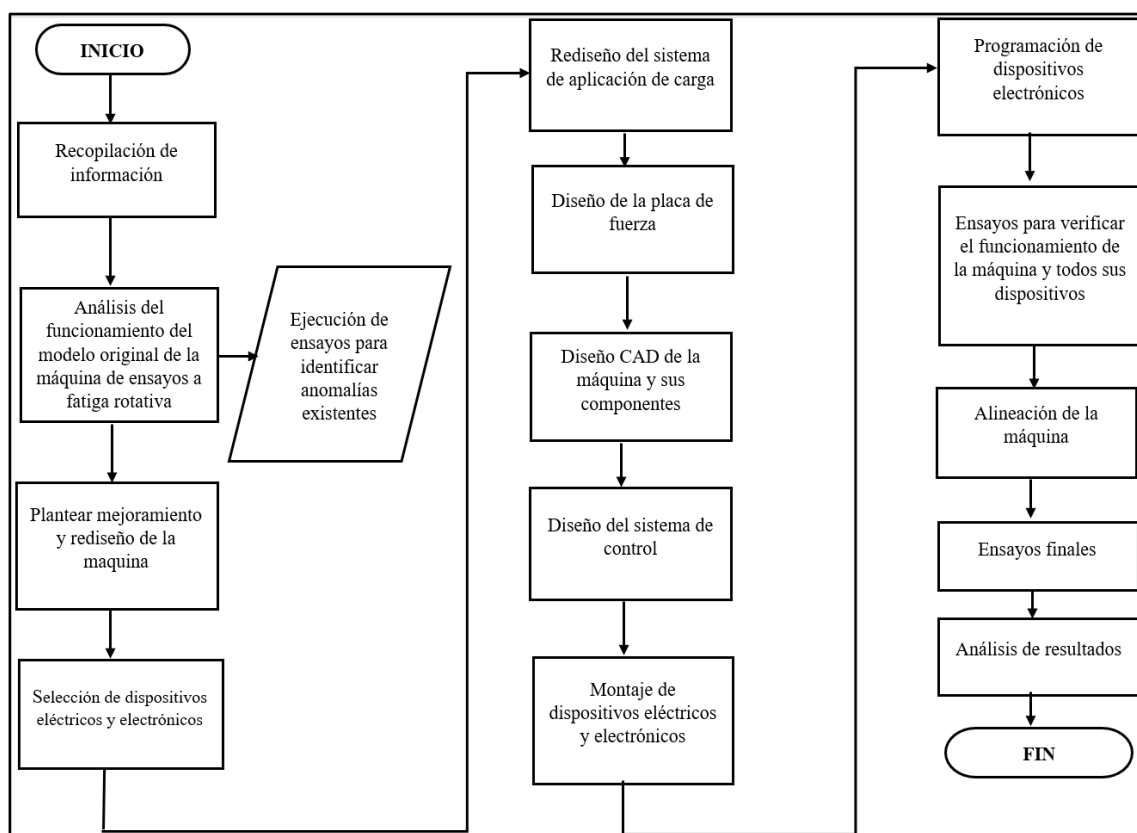
Esta etapa se centra en la estructura y configuración del proyecto, abarcando todos los aspectos relacionados con la posible solución al problema existente. Durante esta etapa es esencial llevar a cabo el diseño mecánico, incluir además planos y análisis necesarios para lograr un modelo funcional que logre resolver los defectos encontrados en ciertos sistemas presentes en la máquina de ensayos a fatiga rotativa de la carrera de Ingeniería Automotriz.

###### **2.1.1.3 Etapa 3**

En este punto se eligen los sensores, actuadores e instrumentación vinculada al rediseño mecánico de la máquina. Se lleva a cabo una fase de simulación para validar la propuesta de diseño. En caso de no cumplir con las especificaciones establecidas, es necesario reconsiderar el diseño propuesto y volver a validar nuevamente con una nueva simulación hasta alcanzar un resultado favorable que satisface las especificaciones de diseño.

### 2.1.1.4 Etapa 4

Durante esta etapa, se ejecuta la implementación, incluye la construcción y verificación del funcionamiento de los actuadores y sensores, la validación del mecanismo de aplicación de carga y finalmente, la realización de las pruebas antes predefinidas con el fin de asegurar el correcto desempeño del diseño propuesto. Estas pruebas son basadas en la normativa vigente que regula el tipo de ensayos a realizar.



**Figura 2.1** Flujograma de proceso metodológico

## 2.2 SELECCIÓN DE MATERIALES Y EQUIPOS

Para alcanzar con los objetivos del trabajo de titulación, se precisa la adquisición e implementación de nuevos equipos eléctricos y electrónicos en la máquina de ensayos a fatiga rotativa disponible en los laboratorios de la carrera de ingeniería automotriz. Además, es necesario el uso de un software especializado para gestionar los parámetros de los dispositivos electrónicos.

## 2.2.1 EQUIPOS NECESARIOS PARA EL SISTEMA DE CONTROL

Los elementos que constituyen el sistema de control se detallan a continuación:

**Tabla 2.1** Materiales

Descripción	Cantidad
Motor Trifásico WEG 2 Hp	1
Variador de frecuencia DELTA	1
PLC	1
Módulo de celda de carga tipo S	1
Actuador	1
Sensor inductivo	1
Gabinete metálico	1

En la **Tabla 2.1** se indican todos los equipos que se requieren para implementar un sistema de control que sea fiable y asegure el buen funcionamiento de la máquina.

### 2.2.1.1 MOTOR TRIFÁSICO WEG W22

Se decide cambiar a un motor trifásico WEG W22, puesto que el motor que se encuentra instalado originalmente no es posible controlar su velocidad porque no es compatible con los variadores de frecuencia. Este tipo de motor es muy utilizado en las industrias, debido a sus características que le permiten tener muchas aplicaciones.

Su funcionamiento consiste cuando la corriente eléctrica circula por las bobinas que se alojan en un bloque compuesto de chapas de acero, los cuales van a generar campos electromagnéticos de tipo rotante que van a interactuar con el rotor y generar la cupla motora que lo hace girar. La cantidad de bobinas dependerá de la velocidad rotante nominal que tenga el motor.

Detalle de las especificaciones del motor en la siguiente **Tabla 2.2**.

**Tabla 2.2** Ficha técnica motor trifásico

<b>Marca</b>	WEG
<b>Modelo</b>	W22 IE3 Premium Efficiency
<b>Alimentación</b>	Trifásica
<b>Voltaje nominal</b>	220 V
<b>Corriente nominal</b>	3,29 A
<b>Potencia</b>	2 HP
<b>Velocidad nominal</b>	1745 RPM
<b>Frecuencia</b>	60 Hz
<b>Par nominal</b>	0,823 kgfm
<b>Número de polos</b>	4

### 2.2.1.2 VARIADOR DE FRECUENCIA DELTA MS 300

Se selecciona este tipo de variador ya que permite controlar la energía suministrada a los motores eléctricos trifásicos, de esta forma son capaces de manipular la velocidad y sentido de giro.

Descripción de las especificaciones del variador de frecuencia en la **Tabla 2.3**.

**Tabla 2.3** Ficha técnica variador de frecuencia

<b>Marca</b>	DELTA
<b>Modelo</b>	MS 300
<b>Voltaje nominal</b>	220 V
<b>Corriente nominal</b>	7,5 A

### 2.2.1.3 PLC DELTA DVP20SX211T

Se opta por un PLC DELTA con las características necesarias para satisfacer el sistema de control, cuenta con las suficientes entradas y salidas para todas las variables que se va a controlar. Por otra parte, el software de programación es fácil de utilizar y con velocidad de ejecución más

rápida, de este modo aumentando su eficiencia en soluciones de control para máquinas industriales. A continuación, se detalla sus características en la **Tabla 2.4**:

**Tabla 2.4** Ficha técnica PLC DELTA DVP20SX211T

<b>Marca</b>	DELTA
<b>Serie</b>	DVP-SX2
<b>CPU</b>	32 bits
<b>Capacidad del programa</b>	16 K pasos
<b>Fuente de alimentación</b>	100-240 VCA, 24 V CC
<b>Entradas</b>	8 (4AI)
<b>Salidas</b>	6 (2AO)

#### 2.2.1.4 HMI DELTA DOP-103BQ

Se elige esta interfaz que cuenta con una pantalla táctil, la cual permiten al operador seleccionar las variables de velocidad y carga a la que se va a realizar los ensayos. Además, esta interfaz tiene comunicación directa con el PLC seleccionado y esto facilita su programación. Sus características se mencionan en la **Tabla 2.5**.

**Tabla 2.5** Ficha técnica HMI DELTA DOP-103BQ

<b>Marca</b>	DELTA
<b>Diseño</b>	Tipo básico DOP-103BQ
<b>Tamaño</b>	4,3"
<b>Resolución</b>	480 x 272 pixels
<b>Voltaje de operación</b>	24 V CC
<b>Tipo</b>	Pantalla táctil
<b>Protección de entrada</b>	IP65. Hermético al polvo, resistente al agua NEMA 4

### 2.2.1.5 MÓDULO DE CELDA DE CARGA

Este componente se selecciona de acorde al PLC, ya que su compatibilidad depende directamente del tipo de serie para que se acoplen de forma adecuada. Sus especificaciones de detallan en la **Tabla 2.6**.

**Tabla 2.6** 1MÓDULO DE CELDA DE CARGA

<b>Marca</b>	DELTA
<b>Serie</b>	DVP SX2
<b>Voltaje de fuente</b>	100-240 VCA, 24 V CC
<b>Número y tipo de entradas</b>	2 - Analógicas

### 2.2.1.6 ACTUADOR LINEAL

Para abastecer la celda de carga se elige un actuador lineal capaz de proporcionar la fuerza necesaria para aplicar la carga a la base móvil. Cuyas especificaciones se mencionan en la **Tabla 2.7**.

**Tabla 2.7** Actuador lineal

<b>Marca</b>	SHENZILI
<b>Modelos de varilla de empuje</b>	ZLD-H2
<b>Carrera de varilla de empuje</b>	150mm
<b>Velocidad de empuje</b>	5 mm/s
<b>Empuje</b>	1000 N
<b>Modelo de motor</b>	D1 – 24V
<b>Potencia Nominal</b>	30W

## 2.2.2 HERRAMIENTAS DIGITALES

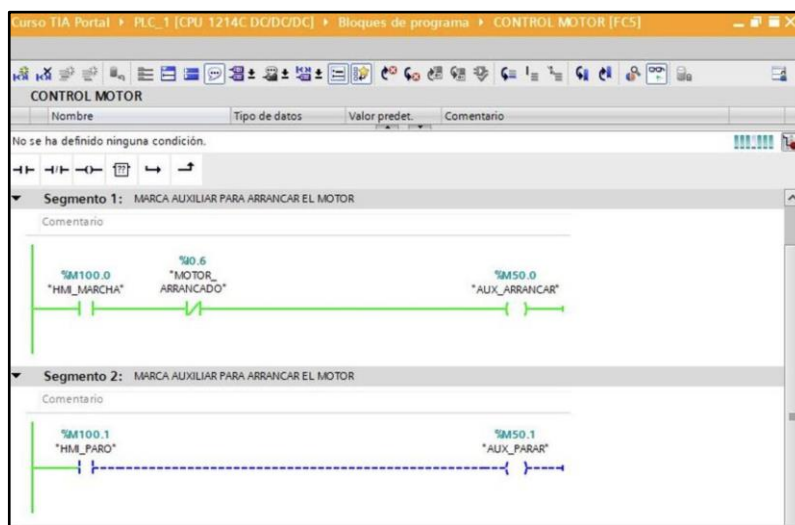
Las aplicaciones o programas diseñados para gestionar datos y automatizar los procesos representan herramientas tecnológicas fundamentales en entornos empresariales. Estas soluciones informáticas facilitan la recolección, almacenamiento y análisis eficiente de datos, permitiendo

una optimización significativa de las operaciones y una mayor productividad en diversas áreas de trabajo.

### 2.2.3 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN “DELTA ISPSOFT”

Delta ISPSOft es un software libre de programación de controladores lógicos programables conocidos como PLC. La programación es en escalera y su lenguaje es llamado KOP con un lenguaje secuencial y diagramas de bloques. Se basa en la lógica de los diagramas eléctricos, donde el lenguaje de Ladder interpreta las señales de izquierda a derecha hasta encontrar una señal o pulso de salida. Por otro lado, el diagrama eléctrico las señales son representadas de arriba hacia abajo hasta encontrar un relé o actuador.

En la **Figura 2.2** la energía está representada de color verde si todas las instrucciones se cumplen la secuencia continua hasta llegar a las salidas digitales, salidas analógicas, salidas PWM, entre otros.

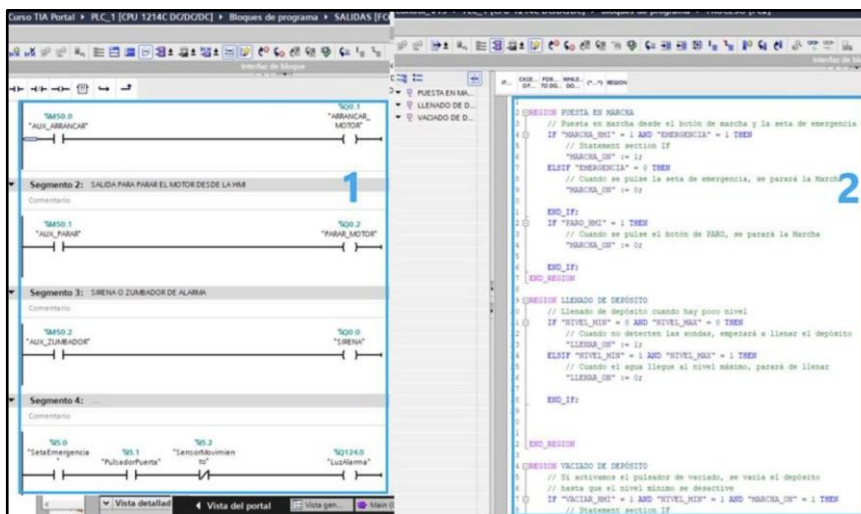


**Figura 2.2** Bloques de programa – Ladder

Obtenido de [59].

Este software viene precargado con dos lenguajes de programación Ladder Logic y C. Como se muestra en la **Figura 2.3**. Las ventajas de usar este programa es que permite guardar y cargar programas, importar y exportar firmware desde el software [60]. Todo el entorno de programación

de Ladder es muy visual, en todo momento la persona va a visualizar por donde viaja la señal hasta su salida.



**Figura 2.3** Interfaz de Ladder

Obtenida de [59]

## 2.3 CONSTATACIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR

En la **Figura 2.4** se muestra la máquina de ensayos a fatiga rotativa que se encuentra en los talleres de la carrera de Ingeniería Automotriz fue diseñada y construida por Chávez y Coyago en [61]. Esta máquina cuenta con varios sistemas y elementos de tipo mecánico que serán automatizados. La modificación propuesta permitirá una obtención de datos más eficiente y confiable, relativos a los resultados de los ensayos experimentales.



**Figura 2.4** Máquina original

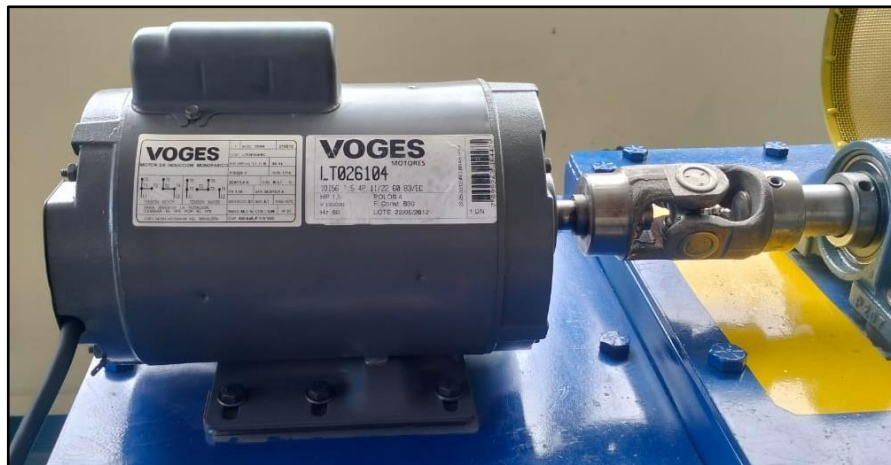
Se realiza un análisis detallado de cada uno de los componentes de la máquina para evidenciar como se encontraba originalmente. Posteriormente se realiza el análisis de funcionamiento de cada



uno de estos elementos y así determinar si es conveniente conservarlos o cambiarlos para construir el sistema de control de la máquina.

### 2.3.1 MOTOR

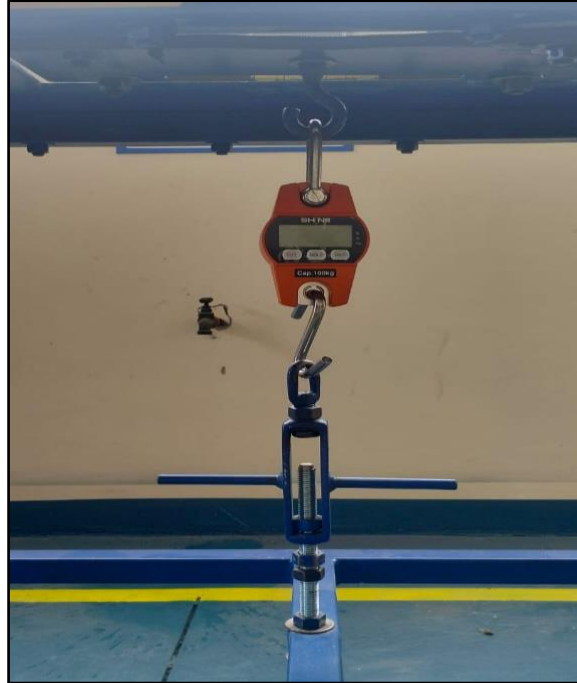
Originalmente la máquina está equipada con un motor monofásico de marca Voges como se indica en la **Figura 2.5** con las siguientes especificaciones: potencia de 1.5 HP, velocidad de giro de 1715 rpm, voltaje de 110 V y frecuencia de 60 Hz.



**Figura 2.5** Motor

### 2.3.2 SISTEMA DE APLICACIÓN DE CARGA

Para la aplicación de la carga se tiene una placa flotante donde van empotrados dos chumaceras que sostienen la probeta como se muestra en la **Figura 2.6**. La carga se distribuye mediante una manivela de ajuste que va acoplado a un eje roscado, la misma que mediante un dinamómetro digital se conecta al centro de la placa de fuerza, para así de esta manera transmitir la carga a la probeta.



**Figura 2.6** Dinamómetro digital y manivela

### 2.3.3 SISTEMA DE SUJECIÓN DE LA PROBETA

Para sujetar la probeta se utilizan mandriles como se aprecia en la **Figura 2.7**, en donde se introduce la probeta y se ajusta en sus extremos.



**Figura 2.7** Sujeción de probeta

### 2.3.4 SISTEMA ELÉCTRICO Y DE ENCENDIDO

El control de la máquina es totalmente manual. Consta de una caja de accesorios metálica donde están incorporados los pulsadores ON/OFF, un tacómetro que permite la lectura de las

revoluciones como se aprecia en la **Figura 2.8**, además de los fusibles y demás dispositivos eléctricos que se encuentran en el interior de la caja.



**Figura 2.8** Tablero eléctrico

### 2.3.5 CONTADOR DE REVOLUCIONES

La máquina cuenta con un sensor inductivo como se observa en la **Figura 2.9**, el cual permite tener la lectura de las rpm, esto mediante los pulsos que se generan cuando el sensor percibe el paso de un imán de neodimio que está ubicado en el eje de transmisión. Este tipo de contadores no proporcionan información exacta del número de ciclos ya que presenta un desfase en su lectura.



**Figura 2.9** Sensor inductivo

### 2.3.6 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA MÁQUINA

Con el fin de determinar el buen funcionamiento de los componentes de la máquina se realizaron varios ensayos previos a la automatización.

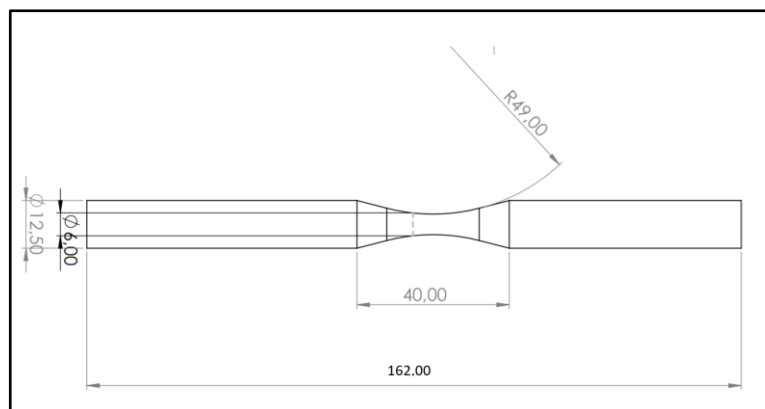
La máquina se apega al diseño de la máquina de Moore, su funcionamiento es el siguiente: Un motor monofásico es el encargado de proporcionar rotación al sistema, este se acopla a un cardán y de este modo transfiere el movimiento a los ejes que sujetan a la probeta. Los ejes conductor y conducido están montados sobre dos rodamientos cada uno y estos dentro de chumaceras como soporte. Una de las chumaceras de cada eje se encuentra fijo en la estructura y la otra va empotrada en una placa flotante que se acopla a un sistema para transmitir la carga a la probeta y así este sometida a flexión para llegar al fallo del material.

### 2.4 CONSIDERACIONES DE LAS PROBETAS

Las probetas se fabricaron bajo la norma ASTM E466, que detallan ciertas características que deben cumplir para utilizarse en ensayos de fatiga:

-Para garantizar falla en la sección de prueba, el área transversal de agarre debe ser al menos 1.5 veces, pero es recomendable para la mayoría de los materiales, al menos cuatro veces el área transversal de la sección de prueba.

Para realizar los ensayos se utilizaron las probetas con las siguientes dimensiones en la **Figura 2.10**.



**Figura 2.10** Dimensiones de probeta

Las probetas fueron construidas en barras de acero AISI 1018. Las mismas que fueron mecanizadas en torno y posteriormente con la finalidad de obtener tres tipos de rugosidad en el

acabo superficial de las probetas se lijaron en dirección axial con lijas de distinta granulación. A continuación, en la **Tabla 2.2** se detalla las variables a considerar para obtener los distintos acabos superficiales:

**Tabla 2.3** Acabado superficial

Lija N°	Tiempo de mecanizado (s)
30	62
60	70
120	96

## 2.5 REDISEÑO DEL SISTEMA DE CARGA

A continuación, se presenta el rediseño integral del sistema de carga, con el objetivo primordial de minimizar cualquier error que pueda surgir durante la ejecución de los ensayos en las probetas, garantizando así una mayor precisión y fiabilidad en los resultados.

### 2.5.1 PROPUESTA DE DISEÑO

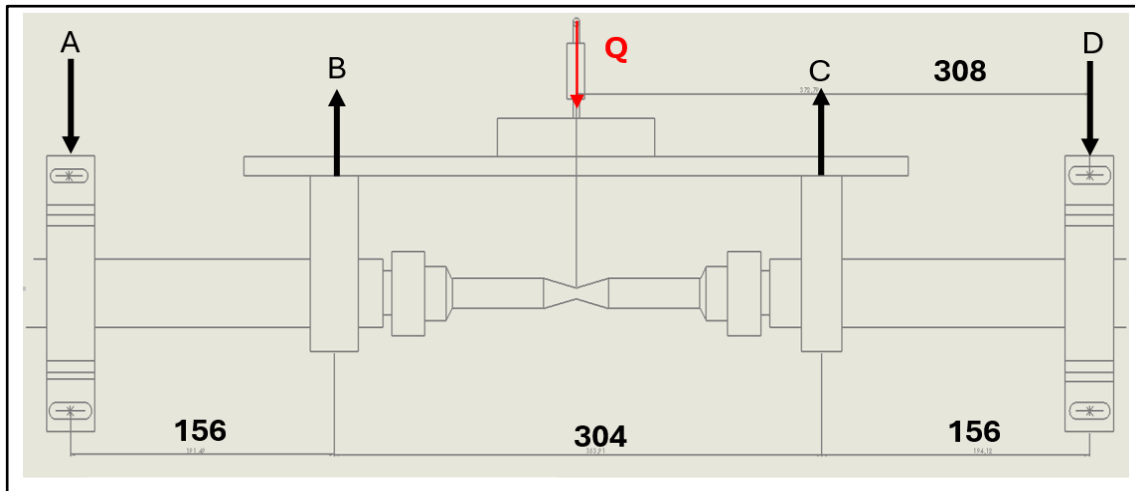
Se analizó el actual sistema de carga y se evidenció que, debido a las vibraciones producidas por el funcionamiento de la máquina, existe una variación de los valores de la carga aplicada durante los ensayos. Además, se recalculó el espesor de la placa de carga para que facilite el pandeo sin llegar a deformación plástica. Por estos motivos se decidió realizar cambios sobre este sistema para que la transmisión de la carga sea horizontal y no vertical como se diseñó originalmente.

De esta manera se pretende aliviar las tensiones previas producidas en la probeta por el sistema de transmisión de carga. Al cambiar esta configuración a vertical se minimiza el efecto de la gravedad y se evita que la probeta este sometida a flexión, aun sin carga aplicada. Además, se reemplaza el sistema mecánico original con componentes electrónicos que permitan un control más eficaz en la aplicación de la carga durante los ensayos.

### 2.5.2 ANÁLISIS DE DISEÑO DE SISTEMA DE CARGA

En la **Figura 2.11** se tiene la fase de diseño del sistema de carga, se lleva a cabo la elaboración de un diagrama de cuerpo libre con el objetivo de identificar los puntos de reacción, carga y flexión,

junto con sus dimensiones correspondientes. Esto se realiza con el fin de considerar de manera integral los diagramas de corte y momento flector.



**Figura 2.11** Análisis de sistema de carga

Donde:

RA: reacción en la chumacera A

RB: reacción en la chumacera B

RC: reacción en la chumacera C

RD: reacción en la chumacera D

Q: carga aplicada

dAB: distancia entre la chumacera A y la chumacera B = 156 mm

dBC: distancia entre la chumacera B y la chumacera C = 304 mm

dCD: distancia entre la chumacera C y la chumacera D = 156 mm

dQD: distancia entre la carga Q y la chumacera D = 308 mm

Al ser un sistema simétrico se tiene que la distancia  $d_{AB} = d_{CD}$  y la distancia  $d_{AQ} = d_{QD}$ . Además, en los rodamientos B y C se transmite la carga Q a la probeta la cual da como resultado  $Q/2$  en cada rodamiento, puesto que, esta se divide para cada apoyo:

$$R_B = R_C = \frac{Q}{2} \quad [2.1]$$

Se realiza la sumatoria de las fuerzas que intervienen en el eje Y, y la sumatoria de momentos en el punto A, para de esta manera determinar los valores de las reacciones A y D que soportan carga de igual magnitud, pero en sentido opuesto a las reacciones B y C.

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ -R_A + R_B + R_C - R_D &= 0 \\ R_A + R_D &= R_B + R_C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_A &= 0 \\ -R_B d_{AB} - R_C d_{AC} + R_D d_{AD} &= 0 \\ R_D d_{AD} &= R_B d_{AB} + R_C d_{AC}\end{aligned}\quad [2.2] \quad [2.3]$$

Reemplazando ecuación 2.1 en 2.2:

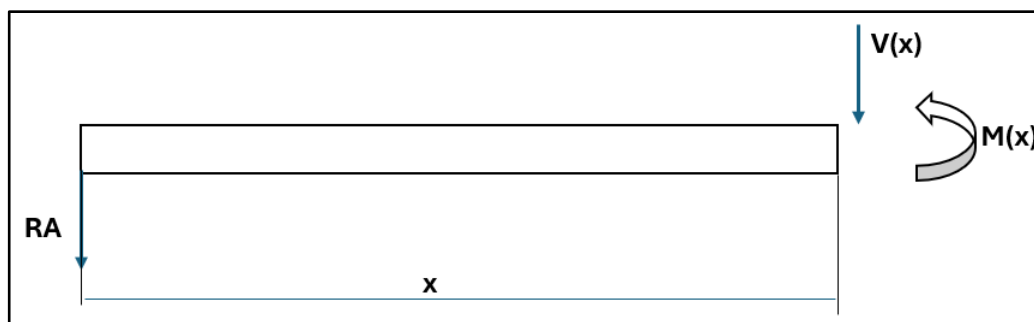
$$\begin{aligned}R_A + R_D &= \frac{Q}{2} + \frac{Q}{2} \\ R_A + R_D &= Q\end{aligned}\quad [2.4]$$

reemplazando ecuación 2.1 en 2.3:

$$\begin{aligned}R_D &= \frac{\frac{Q}{2}d_{AB} + \frac{Q}{2}d_{AC}}{d_{AD}} \\ R_D &= \frac{\frac{Q}{2}d_{AC}}{d_{AC}}\end{aligned}\quad [2.5]$$

Por lo tanto:  $R_D = \frac{Q}{2} = R_A$

**Cálculo de la fuerza cortante  $V(x)$  y momento flector  $M(x)$  de la paca de fuerza**  
**Tramo A-B, para  $A \leq x \leq B$**



**Figura 2.12** Fuerza y momento flector tramo A-B

**Ecuación  $V(x)$**

$$\begin{aligned}-R_A - V(x) &= 0 \\ V(x) &= -R_A \\ V(x) &= -\frac{Q}{2}\end{aligned}$$

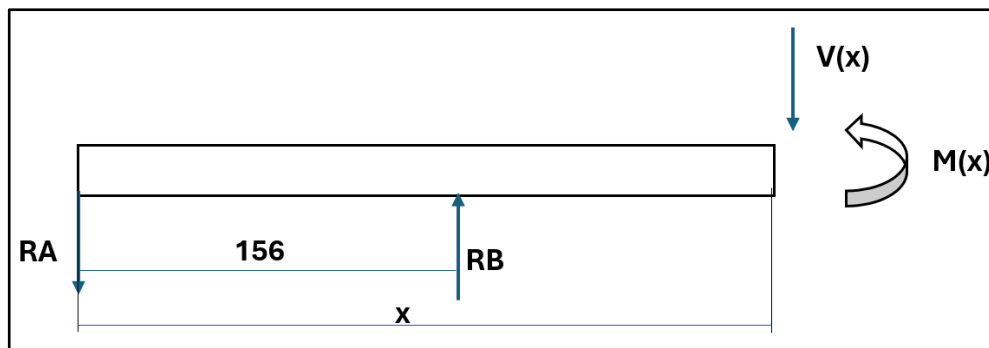
[2.6]

**Ecuación  $M(x)$**

$$\begin{aligned}R_A x + M(x) &= 0 \\ M(x) &= -R_A x \\ M(x) &= -\frac{Q}{2}x\end{aligned}$$

[2.7]

**Tramo B-C, para  $B \leq x \leq C$**



**Figura 2.13** Fuerza y momento flector tramo B-C

**Ecuación V(x)**

$$-R_A + R_B - V(x) = 0$$

$$V(x) = -R_A + R_B$$

$$V(x) = \frac{Q}{2} - \frac{Q}{2}$$

$$V(x) = 0$$

[2.8]

**Ecuación M(x)**

$$R_A x - R_B(x - d_{AB}) + M(x) = 0$$

$$M(x) = -R_A x + R_B(x - d_{AB})$$

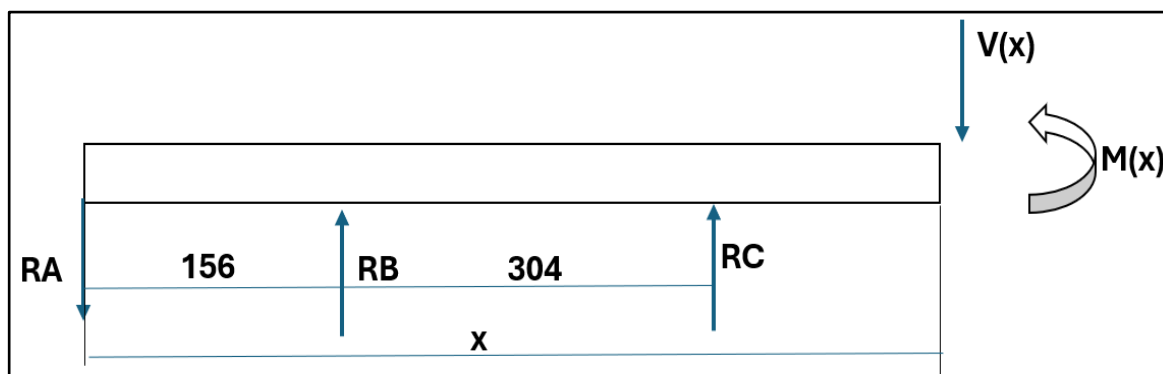
$$M(x) = -\frac{Q}{2}x + \frac{Q}{2}(x - d_{AB})$$

$$M(x) = -\frac{Q}{2}x + \frac{Q}{2}x - \frac{Q}{2}d_{AB}$$

$$M(x) = -\frac{Q}{2}d_{AB}$$

[2.9]

**Tramo C-D, para  $C \leq x \leq D$**



**Figura 2.14** Fuerza y momento flector tramo C-D

**Ecuación V(x)**

$$-R_A + R_B + R_C - V(x) = 0$$

$$V(x) = -R_A + R_B + R_C$$

$$V(x) = -\frac{Q}{2} + \frac{Q}{2} + \frac{Q}{2}$$

**Ecuación M(x)**

$$R_A x - R_B(x - d_{AB}) - R_C(x - d_{AC}) + M(x) = 0$$

$$M(x) = -R_A x + R_B(x - d_{AB}) + R_C(x - d_{AC})$$

$$M(x) = -R_A x + R_B x - R_B d_{AB} + R_C x - R_C d_{AC}$$

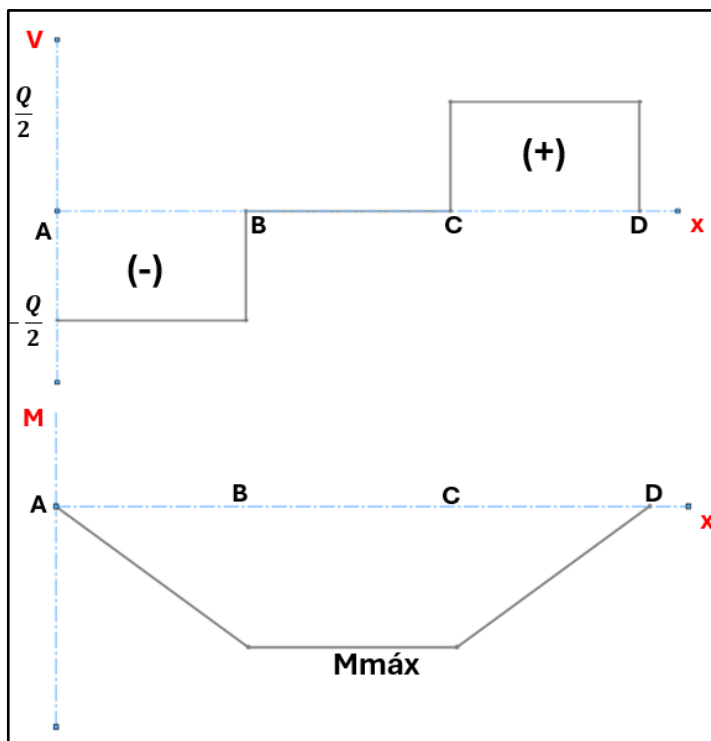


$$V(x) = \frac{Q}{2}$$

$$[2.10] \quad M(x) = -\frac{Q}{2}x + \frac{Q}{2}x - \frac{Q}{2}d_{AB} + \frac{Q}{2}x - \frac{Q}{2}d_{AC}$$

$$M(x) = \frac{Q}{2}x - \frac{Q}{2}d_{AB} - \frac{Q}{2}d_{AC}$$

$$M(x) = \frac{Q}{2}(x - d_{AB} - d_{AC}) \quad [2.11]$$



**Figura 2.15** Diagrama de corte y momento flector

El mayor momento flector que soportará el sistema será en el tramo BC, justamente en el área de menor diámetro de la probeta. Por lo tanto:

$$M_{máx} = \frac{Q}{2}d_{AB} \quad [2.12]$$

El esfuerzo que produce el momento flector totalmente alternante sobre la probeta se determina mediante la ecuación:

$$\sigma_a = \frac{M_{máx} C}{I} \quad [2.13]$$

Donde:

C: distancia entre a línea neutra de la probeta y la fibra más lejana

I: momento de inercia

Cálculo de C, I:

$$C = \frac{d_{probeta}}{2} \quad [2.14]$$

$$I = \frac{\pi (d_{probeta})^4}{64} \quad [2.15]$$

Donde:

$d_{probeta}$ : menor diámetro de la probeta

Reemplazando las 2.14 y 2.15 tenemos:

$$\sigma_a = \frac{32 M_{m\acute{a}x}}{\pi (d_{probeta})^3} \quad [2.16]$$

Reemplazando la ecuación 2.16 en 2.12 se obtiene:

$$\sigma_a = \frac{16 Q d_{AB}}{\pi (d_{probeta})^3} \quad [2.17]$$

La condición para que se produzca la rotura de la probeta es que el esfuerzo alternante generado por la carga sea igual al esfuerzo de fatiga:

$$\sigma_a = S_f$$

Al igualar las ecuaciones 1.3 y 2.17 se determina la ecuación para determinar la carga teórica a la que se produce la fractura a un determinado ciclo.

$$\frac{16 Q d_{AB}}{\pi (d_{probeta})^3} = a N^b$$

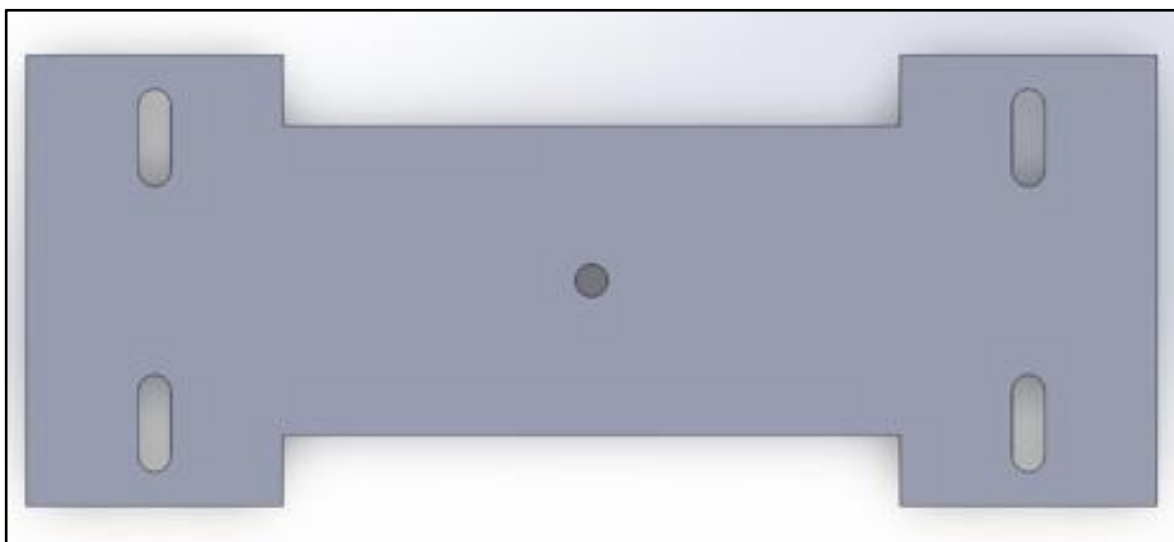
$$Q = \frac{a N^b \pi (d_{probeta})^3}{16 d_{AB}} \quad [2.18]$$

Teniendo como dato las RPM del motor podemos calcular el tiempo teórico de rotura de la probeta en un determinado ciclo, mediante la fórmula:

$$t_t = \frac{N}{RPM_{motor}} \quad [2.19]$$

## 2.6 DISEÑO DE LA PLACA DE FUERZA

La placa de fuerza es la encargada de transmitir la carga a las chumaceras y por ende a la probeta de ensayo. Se decidió diseñar una nueva placa de fuerza, puesto que la que estaba instalada originalmente no era simétrica, esto implicaba en que la carga no sea aplicada uniformemente. Se puede observar el diseño de la nueva placa en la **Figura 2.16**.



**Figura 2.16** Placa de fuerza

Obtenida de [61]

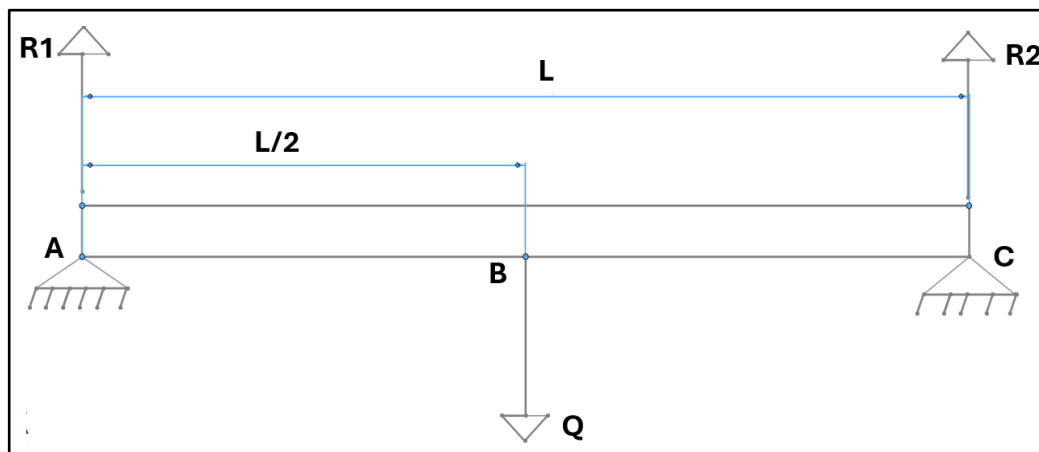
Esta placa está construida en acero estructural ASTM A36

**Tabla 2.9** Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

Esfuerzo a la fluencia mínimo	Sy	250 MPa
Esfuerzo a la tensión	Sut	400-550 MPa
Módulo de elasticidad	E	200000 MPa

Para el cálculo de la placa, se la considera como una viga simplemente apoyada de sección constante. La carga será aplicada en el centro de la placa mediante una celda de carga de 1000 N

como valor máximo. A continuación, se detalla en la **Figura 2.17** el diagrama de cuerpo libre de la placa.



**Figura 2.17** Diagrama de cuerpo libre

Se realiza la sumatoria de las fuerzas que intervienen en el eje Y, y la sumatoria de momentos en el punto A, para de esta manera determinar los valores de las reacciones 1 y 2

Donde:

$R_1$ : reacción de la chumacera en el punto A

$R_2$ : reacción de la chumacera en el punto C

Q: carga aplicada

L: longitud de la placa

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - Q + R_2 = 0$$

$$R_1 + R_2 = Q$$

$$R_1 = Q - R_2$$

[2.20]

$$\sum M_A = 0$$

$$-Q * \frac{L}{2} + R_2 * L = 0$$

$$R_2 * L = Q * \frac{L}{2}$$

$$R_2 = \frac{Q}{2}$$

[2.21]

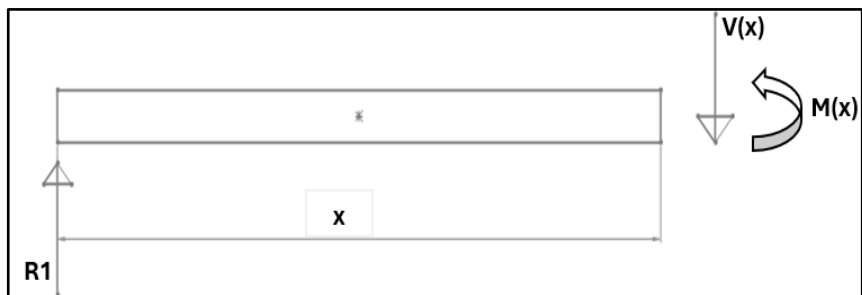
Reemplazo de la ecuación 2.20 en la ecuación 2.21:

$$R_1 = Q - \frac{Q}{2} \quad [2.22]$$

$$\text{Por lo tanto: } R_1 = \frac{Q}{2} = R_2 \quad [2.23]$$

**Cálculo de la fuerza cortante V(x) y momento flector M(x) de la paca de fuerza**

En la **Figura 2.18** se analiza el tramo A-B, para  $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$



**Figura 2.18** Fuerza y momento flector tramo A-B

Ecuación  $V(x)$

$$R_1 - V(x) = 0$$

$$V(x) = R_1$$

$$V(x) = \frac{Q}{2} \quad [2.24]$$

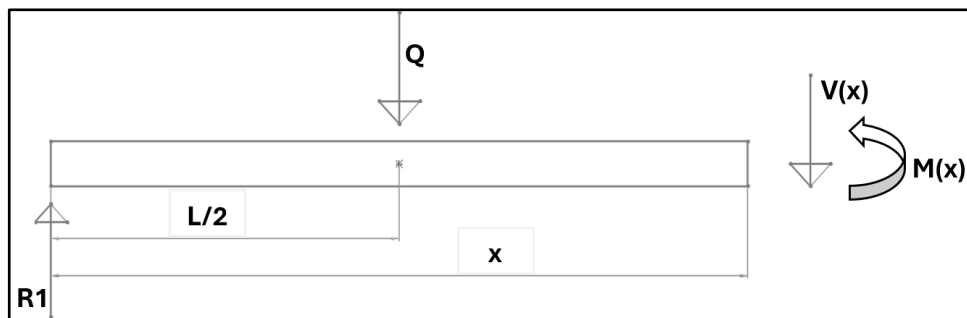
Ecuación  $M(x)$

$$-R_1 * x + M(x) = 0$$

$$M(x) = R_1 * x$$

$$M(x) = \frac{Q}{2} * x \quad [2.25]$$

En la **Figura 2.19** se analiza el tramo B-C, para  $\frac{L}{2} \leq x \leq L$



**Figura 2.19** Fuerza y momento flector tramo B-C

Ecuación  $V(x)$

$$R_1 - Q - V(x) = 0$$

$$V(x) = R_1 - Q$$

$$V(x) = \frac{Q}{2} - Q$$

$$V(x) = -\frac{Q}{2} \quad [2.26]$$

Ecuación  $M(x)$

$$-R_1 * x + Q * \left(x - \frac{L}{2}\right) + M(x) = 0$$

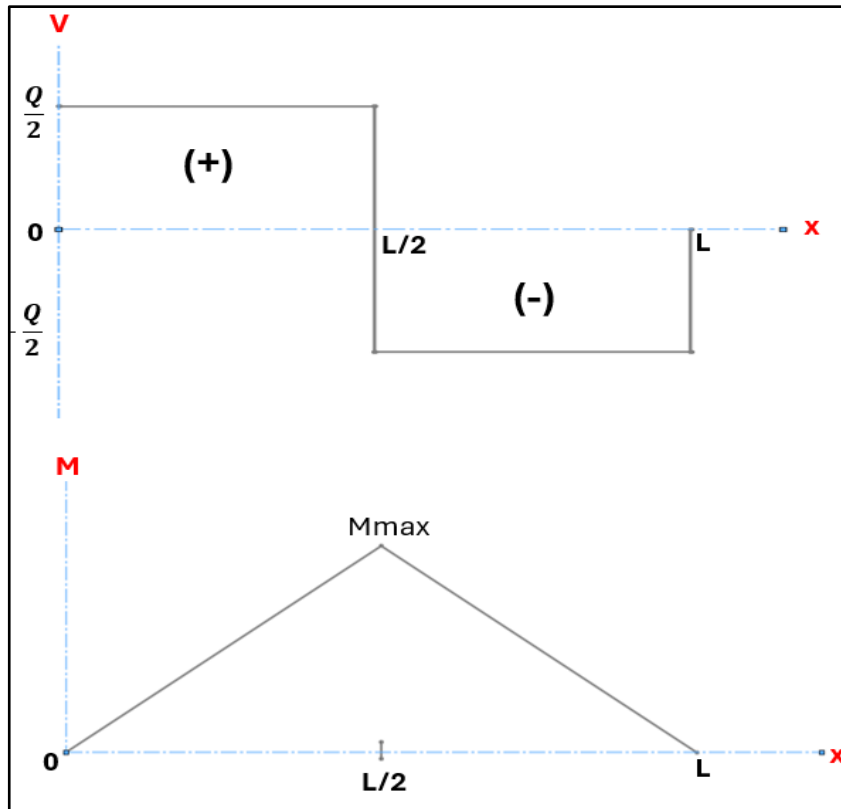
$$M(x) = R_1 * x - Q * \left(x - \frac{L}{2}\right)$$

$$M(x) = \frac{Q}{2} x - Q * \left(x - \frac{L}{2}\right)$$

$$M(x) = \frac{Q}{2} x - Qx + Q \frac{L}{2}$$

$$M(x) = -\frac{Q}{2} x + Q \frac{L}{2}$$

$$M(x) = \frac{Q}{2}(L - x) \quad [2.27]$$



**Figura 2.20** Diagrama de corte y momento flector

De acuerdo con la **Figura 2.20** que corresponde al diagrama de momento flector se determina que cuando  $x = \frac{L}{2}$  existe el momento flector máximo, por lo tanto, al reemplazar en la ecuación 2.25 se obtiene la ecuación correspondiente:

$$M_{max} = \frac{Q}{2} * \frac{L}{2}$$

$$M_{max} = \frac{Q * L}{4} \quad [2.28]$$

Para el cálculo de espesor de placa de fuerza, la condición que se debe cumplir es que el esfuerzo al que va a estar sometida la placa debe ser menor o igual al esfuerzo permisible, para que la placa no produzca ningún fallo cuando esté sometida a carga durante los ensayos.

$$\sigma \leq [\sigma]$$

$$\sigma \leq \frac{S_y}{n_s} \quad [2.29]$$

Donde:

$[\sigma]$ : esfuerzo permisible

$\sigma$ : esfuerzo en la placa

$S_y$ : Esfuerzo a la fluencia mínimo

$n_s$ : factor de seguridad

Para calcular la resistencia a la flexión en vigas se necesita determinar el esfuerzo máximo a flexión que se calcula mediante la ecuación:

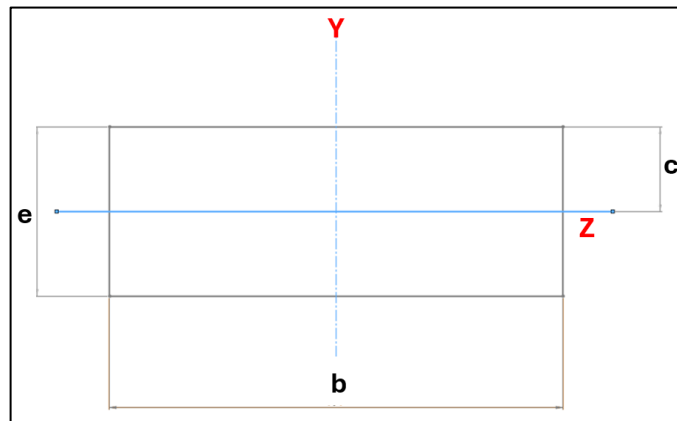
$$\sigma = \frac{M_{max} * c}{I_z} \quad [2.30]$$

Donde:

$M_{max}$ : momento flector máximo en el punto crítico de la placa

$c$ : distancia desde la capa neutra hasta las capas exteriores

$$c = \frac{e}{2} \quad [2.31]$$



Donde

$e$ : espesor de la placa

$I_z$ : momento de inercia en z, se calcula mediante la ecuación:

$$I_z = \frac{be^3}{12} \quad [2.32]$$

Donde:

b: ancho de la placa

Reemplazando las ecuaciones 2.30 y 2.31 en la ecuación 2.10 tenemos

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M_{max} * \frac{e}{2}}{\frac{be^3}{12}} \\ \sigma &= \frac{6 * M_{max} * e}{be^3} \end{aligned} \quad [2.33]$$

Reemplazando la ecuación 2.33 en la 2.29:

$$\begin{aligned} \frac{6 * M_{max}}{be^2} &\leq \frac{S_y}{n_s} \\ e &\geq \sqrt{\frac{6 * M_{max} * n_s}{b * S_y}} \end{aligned} \quad [2.34]$$

Para el cálculo de la deflexión de la placa de fuerza se utiliza la siguiente ecuación:

$$Y_{max} = \frac{Q * L^3}{48 * E * I_z} \quad [2.35]$$

Donde:

Q: carga aplicada

L: longitud de la placa

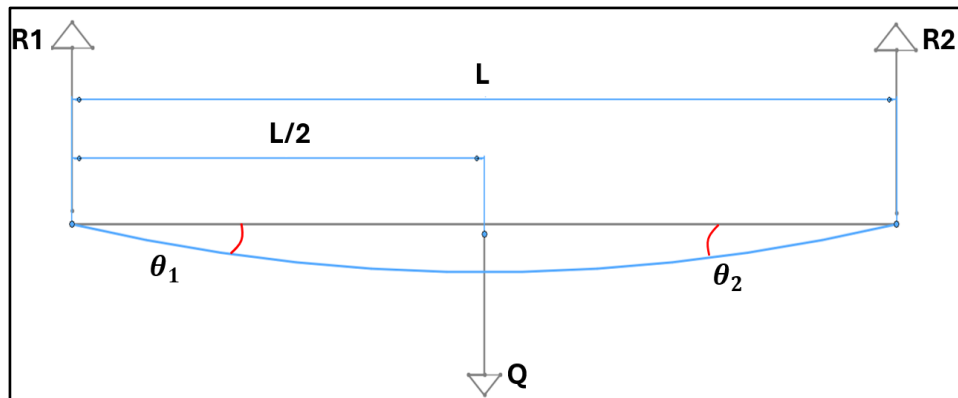
E: módulo de elasticidad del acero A36

Iz: momento de inercia en z

### Cálculo de la placa de fuerza

La aplicación de la carga y las reacciones sobre la placa de fuerza se muestra en la **Figura 2.21**.





**Figura 2.21** Diagrama de cuerpo libre de placa de fuerza

Donde:

$$L = 440 \text{ mm}$$

$$Q = 100 \text{ kgf} = 1000 \text{ N}$$

Además, se consideran los siguientes valores para los cálculos correspondientes:

$$S_y \text{ del acero A36} = 250 \text{ MPa}$$

$$\text{Factor de seguridad para carga estática } 1,5 \leq n_s \leq 2,5$$

$$b: \text{ ancho de la placa} = 175 \text{ mm}$$

**Cálculo de reacciones en la placa mediante la ecuación 2.21.**

$$R_1 = R_2 = \frac{Q}{2}$$

$$R_1 = R_2 = \frac{1000}{2} \text{ N}$$

$$R_1 = R_2 = 500 \text{ N}$$

**Cálculo del momento flector máximo mediante la ecuación 2.28.**

$$M_{max} = \frac{Q * L}{4}$$

$$M_{max} = \frac{1000 * 440}{4}$$

$$M_{max} = 110\,000 \text{ MPa}$$

**Cálculo del espesor de la placa de fuerza con la ecuación 2.34 para  $n_s=1,5$**

$$e \geq \sqrt{\frac{6 * M_{max} * n_s}{b * S_y}}$$

$$e \geq \sqrt{\frac{6 * 110000 * 2,5}{175 * 250}}$$

$$e \geq 4,76 \text{ mm}$$

**Cálculo del espesor de la placa de fuerza con la ecuación 2.34 para  $n_s=2,5$**

$$e \geq \sqrt{\frac{6 * M_{max} * n_s}{b * S_y}}$$

$$e \geq \sqrt{\frac{6 * 110000 * 2,5}{175 * 250}}$$

$$e \geq 6,14 \text{ mm}$$

Al obtener estos valores de espesor que están entre el intervalo del factor de seguridad se determina utilizar una placa con 6 mm de espesor que sería la más adecuada.

**Cálculo del momento de inercia utilizando la ecuación 2.31.**

$$I_z = \frac{be^3}{12}$$

$$I_z = \frac{175 * 8^3}{12}$$

$$I_z = 7466,6 \text{ mm}^4$$

**Cálculo de la deflexión en la placa de fuerza mediante la ecuación 2.34.**

$$Y_{max} = \frac{Q * L^3}{48 * E * I_z}$$

$$Y_{max} = \frac{1000 * 440^3}{48 * 200000 * 7466,6}$$

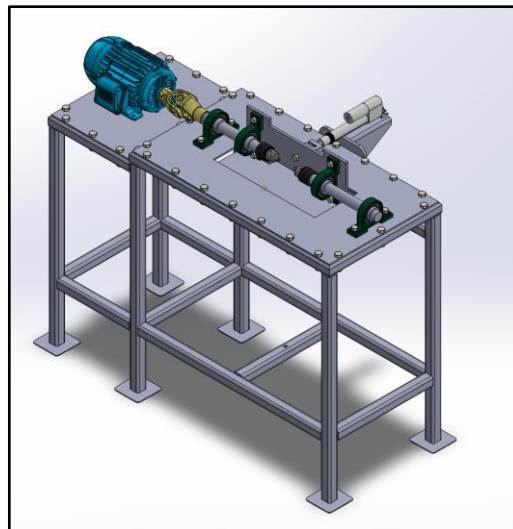
$$Y_{max} = 1,18 \text{ mm}$$

## 2.7 DISEÑO CAD

Para la propuesta de mejora el diseño se lo realizó en el software SolidWorks dado que la institución cuenta con licencia para el uso de los estudiantes. A continuación, se presentarán las figuras correspondientes al modelo preliminar propuesto y modelo final que será implementado.

### 2.7.1 MODELO FINAL

En la **Figura 2.22** se observa el modelo final ensamblado con todas las modificaciones realizadas en la estructura. Se observa el rediseño del sistema de aplicación de carga y el motor trifásico necesario para satisfacer las necesidades para la automatización.

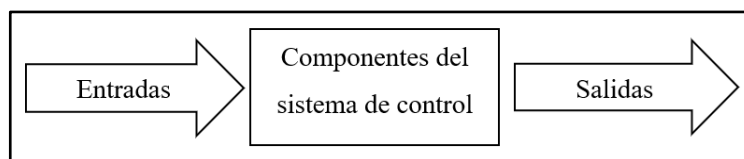


**Figura 2.22** Modelo final

## 2.8 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control facilita al operador el manejo de la máquina a través de variables que intervienen en el proceso de funcionamiento de la máquina y de este modo aumentar su efectividad.

Para cualquier tipo de sistema control existen tres elementos que se mencionan en la **Figura 2.23** que hay que considerar:



**Figura 2.23** Esquema de sistema de control

Para poder cumplir con los requerimientos que exige el sistema de control es necesario contar con varios componentes que garanticen una obtención de datos eficiente.

## 2.9 MONTAJE DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

A continuación, se detalla el procedimiento de ensamblaje de cada uno de los componentes que forman parte del sistema de control de la máquina, posteriormente se realizan pruebas de comprobación del buen funcionamiento del sistema de control en general, para garantizar la obtención de buenos resultados durante los ensayos finales.

### 2.9.1 MONTAJE DE MOTOR TRIFÁSICO

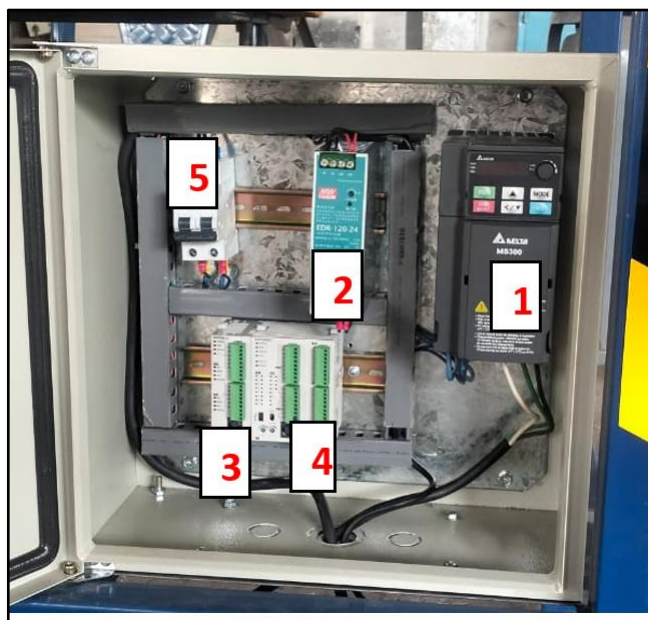
Como se pudo constatar en el diagnóstico de la máquina, es necesario contar con un motor trifásico para poder controlar su velocidad y cumplir con los objetivos del proyecto. Por lo tanto, se instaló un motor trifásico nuevo, con las características mostradas en la **Tabla 2.3**. Se colocó en el mismo lugar donde se encontraba situado el motor monofásico original, como se muestra en la **Figura 2.24**.



**Figura 2.24** Motor trifásico WEG

## 2.9.2 MONTAJE DE COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS EN LA CAJA DE ACCESORIOS

Para realizar la instalación de los dispositivos eléctricos y electrónicos del sistema de control se utilizó una caja metálica de 40x40x20 cm. Se colocó cada componente como recomiendan los fabricantes y se sujetaron al tablero por medio de tornillos, como se puede apreciar en la **Figura 2.25**.



**Figura 2.25** Gabinete

- 1) Variador de frecuencia
- 2) Fuente
- 3) Módulo de celda de carga
- 4) PLC
- 5) Breaker

## 2.9.3 MONTAJE DE HMI

Se colocó la pantalla HMI en una caja plástica para mantenerla fija y protegida. Se utilizó tubo de acero de 2 cm de diámetro, que se encuentra unido mediante soldadura a la estructura metálica de la máquina y de esta manera mantener la pantalla fija y al alcance del operador, como se puede apreciar en la **Figura 2.26**.



**Figura 2.26** Montaje de HMI

#### 2.9.4 MONTAJE DE PLACA DE FUERZA

Se colocó la misma placa de fuerza existente en el modelo de la máquina preliminar, es de acero A36 con un espesor de 8 mm que se encuentra unida a dos puntos fijos, las chumaceras y a la celda de carga este mecanismo se va a encargar de transmitir el valor de la carga hacia la probeta, como se observa en la **Figura 2.27**.

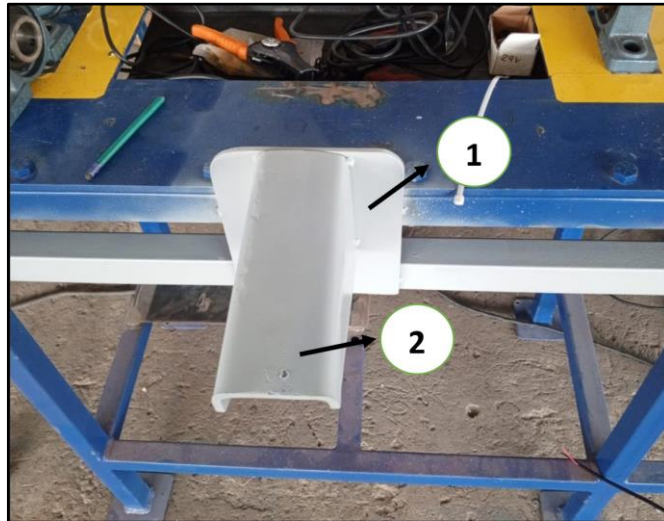


**Figura 2.27** Montaje de placa de fuerza

#### 2.9.5 MONTAJE DE PLACA SOPORTE DE ACTUADOR LINEAL

Esta base consta de dos placas de acero A36, la primera placa (①) cuenta con un espesor de 10 mm y va unida de forma fija a la estructura existente, la segunda placa (②) es de 6 mm de espesor en forma de un canal tipo C con un doble de 90 grados en sus dos caras, va unida en la

primera placa con la finalidad de ser un soporte para el actuador lineal, como se muestra en la **Figura 2.28**.



**Figura 2.28** Montaje de placa soporte de actuador lineal

### 2.9.6 MONTAJE DE CELDA DE CARGA

La celda de carga tipo S cumple la función de medir el valor de la carga aplicada hacia la placa de fuerza y enviar el valor al HMI, se encuentra intermedia entre la placa de fuerza y el actuador lineal, como se observa en la **Figura 2.29**.



**Figura 2.29** Montaje de celda de carga

### 2.9.7 MONTAJE DE ACTUADOR LINEAL

El actuador cuenta con un recorrido de 150 mm y capaz de aplicar una fuerza máxima de 1000N, se encuentra unido a la celda de carga, este es el encargado de aplicar la fuerza hacia la

placa de fuerza y el valor aplicado será registrado por la celda de carga y transmitido al HMI, como se observa en la **Figura 2.30**.

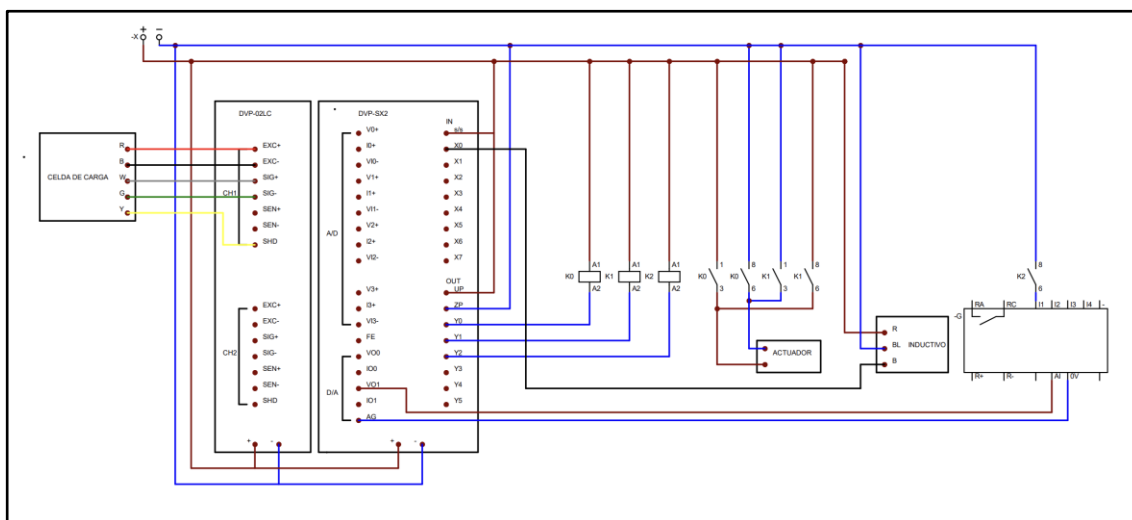


**Figura 2.30** Montaje de actuador lineal

## 2.10 AUTOMATIZACIÓN

### 2.10.1 DIAGRAMAS DE INSTRUMENTACIÓN

En el diagrama de instrumentación se cuenta con la celda de carga, sensor inductivo y actuador los cuales van conectados a un controlador lógico programable y la interfaz HMI para visualizar la información del proceso del ensayo, como se muestra en la **Figura 2.31**.

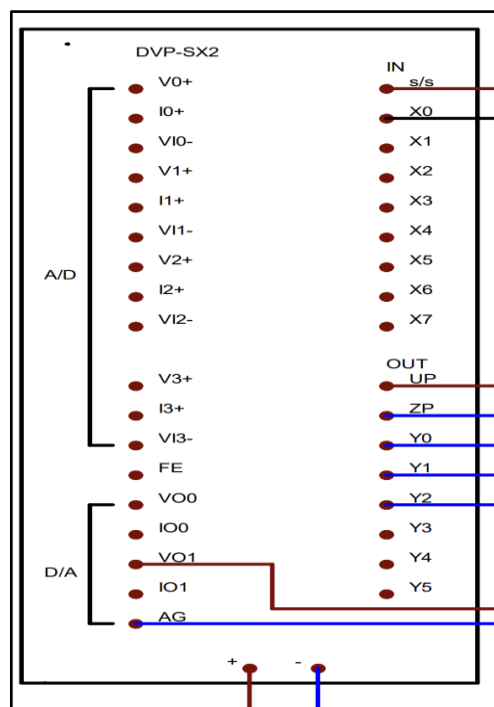


**Figura 2.31** Diagrama de instrumentación



## 2.10.2 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN DE PLC

En la **Figura 2.32** se visualiza el esquema de conexiones de entradas y salidas del PLC, mientras que en la tabla se proporciona un desglose detallado de las variables empleadas en la **Tabla 2.10**.



**Figura 2.32** Diagrama de conexión del PLC

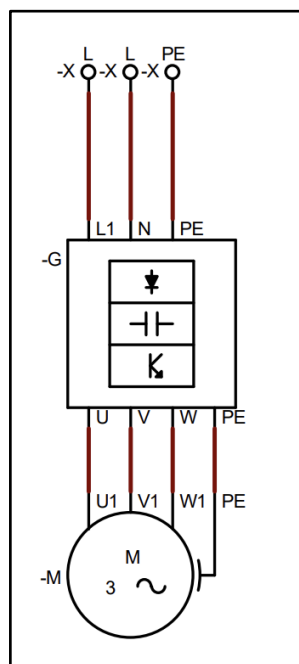
**Tabla 2.10** Variables PLC

Input	Nombre	Almacenamiento	Tipo de dato	Sensor	Función
	X0	D312	Real	Inductivo	Contador de RPM.
	X2	D22	Real		Velocímetro.
	Módulo acoplado al PLC	D310	Real	Celda de carga	Medidor de carga aplicada.
Output	Nombre	Almacenamiento	Tipo de dato		Función
	Y0	M100	BOOL		Actuador dirección 1.

	Y1	M200	BOOL		Actuador dirección 2.
	Y2	M1	BOOL		Encender motor.
	AVI	D10	WORD		Salida analógica de voltaje (0-10V).

### 2.10.3 PLANO ELÉCTRICO

Se presenta el esquema de conexiones eléctricas de la máquina. En la **Figura 2.33** se puede apreciar que la máquina debe estar conectada a su fuente de alimentación, que en este caso corresponde a la red eléctrica con un voltaje de 220 CA. A continuación, se encuentra un sistema de control que tiene la responsabilidad de autorizar o bloquear el flujo de corriente. De esta fuente principal se deriva la energía para la fuente que reduce y rectifica a 24 V. Por otro lado, el variador de frecuencia se encarga de alimentar el motor, permitiendo de esta manera su control.

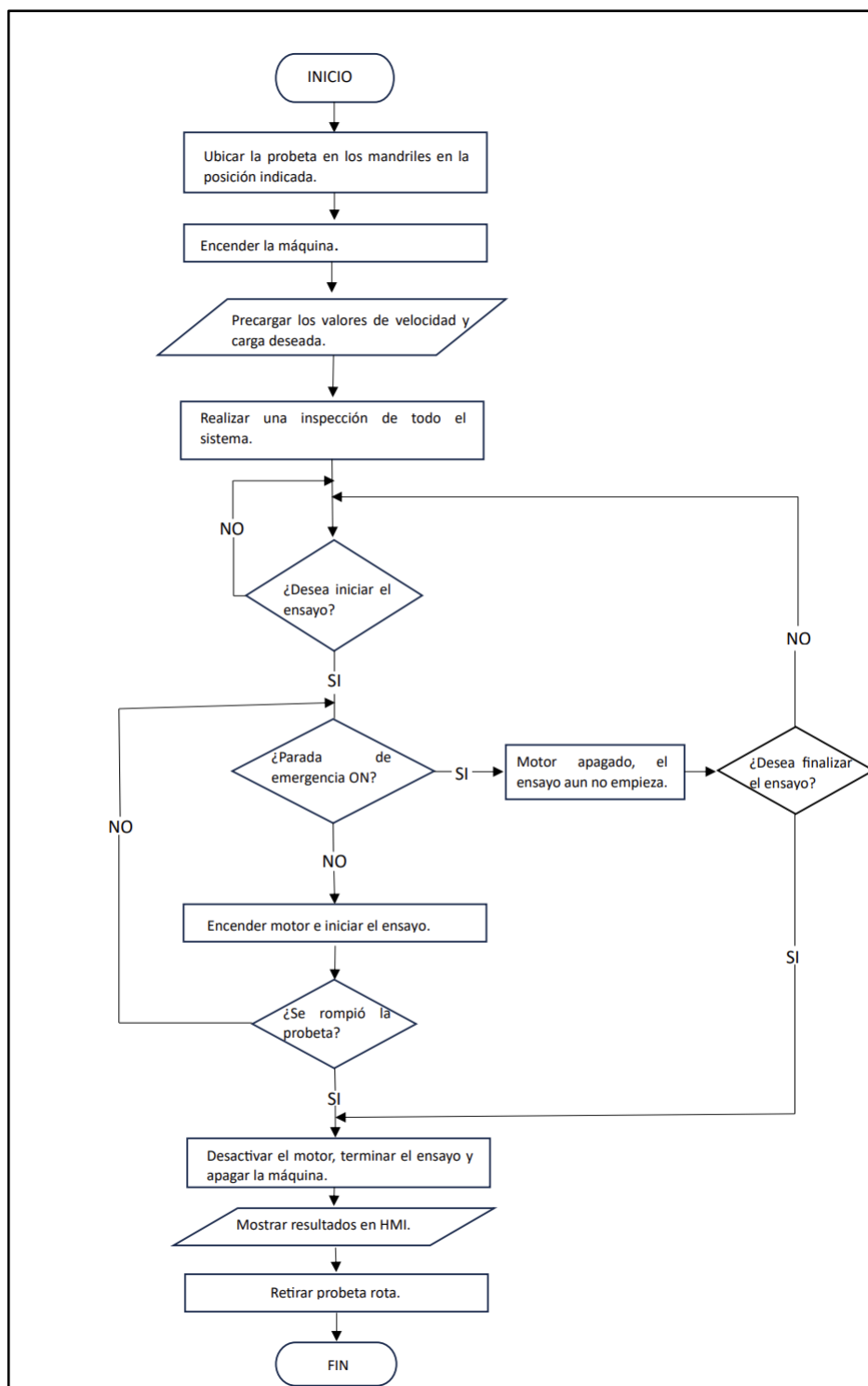


**Figura 2.33** Plano eléctrico

## 2.11 PROGRAMACIÓN

La programación y configuración de los actuadores y sensores encargados del control de la máquina se realiza considerando una lógica planteada en el diagrama de flujo representado en la **Figura 2.34**.

En el anexo 1 se muestra los parámetros de programación realizadas en el PLC, donde se muestra la lógica en forma de escalera que fue realizado en Delta ISPSOft.



**Figura 2.34** Diagrama de flujo de la programación

### 2.11.1 PROGRAMACIÓN DE VARIADOR DE FRECUENCIA

En la programación del variador, se consideró los datos de la placa del motor. A continuación, en la **Tabla 2.11** se detallan los parámetros que se tomaron en cuenta para la configuración del variador con sus respectivos valores.

**Tabla 2.11** Programación de variador de frecuencia

PARÁMETRO	PR	DESCRIPCIÓN	VALORES
<b>Aceleración</b>	01.12	10	Rampa de aceleración del motor.
<b>Desaceleración</b>	01.13	3	Rampa de desaceleración del motor.
<b>Activación</b>	00.20	2	Parámetro de frecuencia del motor. En este caso “2” indica que se utilizara una señal externa para dar el valor de la frecuencia aplicada. En PR 03.00 se configura la entrada analógica que se utilizará.
	00.21	1	Parámetro de activación del motor. En este caso se indica que se utilizará una señal externa para dar la señal de arranque al motor.
	03.00	1	Se establece la función de la entrada alógica AVI, en este caso indicará la frecuencia del variador.

## 2.12 PROGRAMACIÓN Y DISEÑO DE HMI

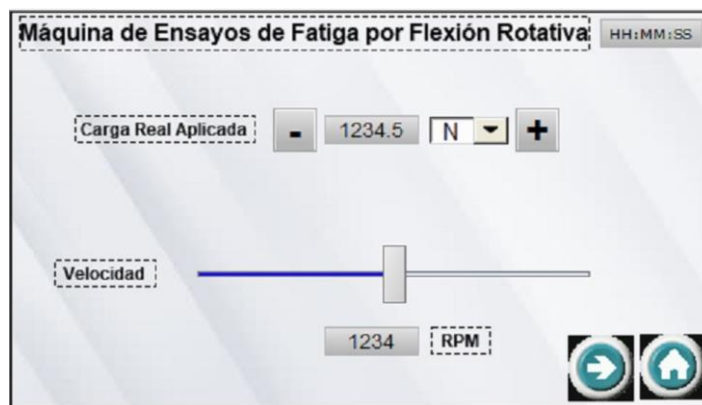
La programación y diseño de la pantalla HMI está enfocado para facilitar el monitoreo del número de ciclos, carga real y tiempo transcurrido en la probeta durante el ensayo a fatiga.

La **Figura 2.35** da la bienvenida, en esta imagen se puede apreciar el momento en que la máquina se energiza y el panel de control se enciende. Para preconfigurar los valores de velocidad del motor y la carga aplicada a la probeta, es necesario presionar la flecha ubicada en la esquina inferior derecha de la imagen.



**Figura 2.35** Bienvenida HMI

En la **Figura 2.36** se presentan los valores a ajustar, como la velocidad del motor y la carga real aplicada a la probeta estos están regidos a las características de cada componente. Cuando se haya precargados los valores deseados es necesario presionar la flecha ubicada en la esquina inferior derecha de la imagen.



**Figura 2.36** Preconfiguración de velocidad y carga

## 2.13 ALINEACIÓN DE LA MÁQUINA

Para garantizar el correcto funcionamiento de la máquina es importante realizar la alineación y calibración de esta, puesto que, de esto dependerá la fiabilidad de los resultados de los ensayos que se realicen.

Los ejes se alinearon tanto paralela y axialmente para evitar que existan fuerzas externas que intervengan durante las pruebas. La calibración de sensores y celda de carga es esencial para obtener lectura correcta del número de ciclos y valor de carga aplicado durante cada ensayo

## 2.14 ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación, se detallan los costos generales de los materiales utilizados, la construcción y la investigación para el mejoramiento de la máquina, para ello se procede a realizar el desglose de los costos involucrados durante el desarrollo de este proyecto.

### 2.14.1 COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

La **tabla 2.12** detalla los costos de todos los materiales que se utilizaron para realizar la automatización de la máquina.

**Tabla 2.12** Costo de materiales

Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Motor trifásico WEG W22	1	260	260
Variador de frecuencia DELTA MS 300	1	330	330
PLC DELTA DVP-20SX211T	1	300	300
Pantalla HMI DELTA DOP-103BQ	1	250	250
Módulo de celda de carga DELTA para DVP SX2	1	370	370
Actuador lineal SHENZILI	1	86	86
Celda de carga	1	115	115
Sensor 24V PNP	1	18	18

Fuente 24V 5A	1	56	56
Relé 24V 8 pines	1	7	7
Breaker 2P	1	7	7
Cable UC-MS030-01ª MINI DIN 9 – serial RS232 hembra	1	12	12
Gabinete metálico	1	60	60
<b>Total</b>			<b>1871</b>

### 2.14.2 COSTO DE ELEMENTOS MECÁNICOS

La **Tabla 2.13** representa los costos de la parte de estructura mecánica donde van a estar montados los equipos eléctricos y electrónicos.

**Tabla 2.13** Costo de materiales mecánicos

Descripción	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Mandriles cónicos	2	42	84
Placa de fuerza	1	15	15
Placa metálica base de Gabinete	1	15	15
Placa metálica base de placa de fuerza	1	30	30
Estructura del actuador	1	26	26
Plancha de propileno 170	2	3	6
<b>Total</b>			<b>176</b>

### 2.14.3 COSTOS VARIOS

En la **Tabla 2.14** se muestran los gastos indirectos que son parte del proyecto



**Tabla 2.14** Costos varios

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (\$)</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Mecanizado de probetas	28	9	252
Examen de rugosidad de probetas	3	45	135
Mano de obra	1	400	400
Logística	1	300	300
Otros gastos	1	200	200
<b>Total</b>			<b>1287</b>

#### 2.14.4 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Se representa la inversión total para la realización de este proyecto en la **Tabla 2.15**.

**Tabla 2.15** Costo total del proyecto

<b>Descripción</b>	<b>Costo (\$)</b>
Costo de materiales eléctricos y eléctricos	1871
Costo de materiales mecánicos	176
Costos varios	1287
<b>Total</b>	<b>3334</b>

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 ETAPA FINAL DEL ENSAMBLE

En la **Figura 3.1** se presenta la máquina de flexión rotativa automatizada. Fue sometida a varias pruebas para confirmar su adecuado funcionamiento, empezando por validar cada componente, subsistemas y así la máquina en su totalidad. El material ensayado podrá ser expuesto a diversas cargas y velocidades durante la ejecución de los ensayos.



**Figura 3.1** Ensamble final

#### 3.2 MEDICIÓN DE RUGOSIDAD DE LAS PROBETAS

Las probetas fueron divididas en 3 grupos de acabado superficial, que se logró con distinta granulación de lija. Se trabajaron muestras correspondientes a cada rugosidad para ser analizado.

La rugosidad de las muestras fue analizada en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, bajo los parámetros mencionados a continuación:

- Norma ASME B46.1 (2009)
- Velocidad de avance 0,25 mm/s, longitud de onda ( $\lambda c$ ) 0,8.
- Se realizó 6 mediciones para cada muestra

**Tabla 3.1** Tabla rugosidad

N° probeta	N° lija	M1 ( $\mu\text{m}$ )	M2 ( $\mu\text{m}$ )	M3 ( $\mu\text{m}$ )	M4 ( $\mu\text{m}$ )	M5 ( $\mu\text{m}$ )	M6 ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
1	30	2,039	1,952	1,879	1,983	2,098	1,981	1,988
2	60	1,108	1,186	1,174	1,187	1,235	1,254	1,190
3	120	0,490	0,482	0,423	0,442	0,470	0,463	0,461

La **Tabla 3.1** muestra los resultados de cada una de las mediciones de rugosidad para cada probeta y en la columna final se promedia la rugosidad con la que se realizarán los cálculos.

### 3.3 VALORES TEÓRICOS PARA LOS ENSAYOS A FATIGA

Partiendo de la resistencia última a la tracción ( $S_{ut}$ ), obtenida de las especificaciones del material, se calcula el límite de resistencia a fatiga mediante la ecuación 1.23.

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200\text{kpsi} \text{ (1400MPa)} \\ 100\text{kpsi} & S_{ut} > 200\text{kpsi} \\ 700\text{Mpa} & S_{ut} > 1400\text{MPa} \end{cases}$$

Para el acero AISI 1018 se tiene un  $S_{ut} = 440\text{MPa}$ . De la **Tabla 1.7**.

Para  $S_{ut} \leq 1400\text{MPa}$  se calcula con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} S'_e &= 0.5S_{ut} \\ S'_e &= 0.5(440) \\ S'_e &= 220\text{MPa} \end{aligned}$$

Se determina el límite a fatiga mediante la ecuación 1.14.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

Para lo cual se requiere obtener los valores de cada uno de los factores que modifican el límite de fatiga:

#### Factor superficial ( $k_a$ )

Mediante la ecuación 1.15. Se determina el valor del factor superficial

$$k_a = a * S_{ut}^b$$

Donde los valores a y b se obtienen de la **Tabla 1.1** (Capítulo 1), considerando que las probetas fueron maquinadas en frío, por lo tanto:

$$a = 4,51$$

$$b = -0,265$$

$$k_a = 4,51 (440)^{-0,265}$$

$$k_a = 0,89$$

### **Factor de tamaño ( $k_b$ )**

Con la ecuación 1.16. Se determina el valor del factor de tamaño, teniendo en cuenta que el diámetro mínimo de la probeta es de 6 mm, comprende al intervalo de:

$$2.79 \leq d \leq 51mm$$

Donde:

$$K_b = 1,24d^{-0,107}$$

$$K_b = 1,24(6)^{-0,107}$$

$$K_b = 1,02$$

### **Factor de carga ( $k_c$ )**

Considerando que la probeta va a estar sometida a flexión durante los ensayos, el valor de este factor se obtiene de la ecuación 1.19.

$$K_c = 1$$

### **Factor de temperatura ( $k_d$ )**

Tomando en cuenta que el valor de la temperatura durante se desconocen, el valor de este factor se determina con la ecuación 1.21.

$$k_d = 1$$

### **Factor de confiabilidad ( $k_e$ )**

De la ecuación 1.22, calculamos este valor.

$$k_e = 1 - 0,08z_a$$

Para esto se valora una confiabilidad del 99% de la **Tabla 1.3**.

Donde:  $z_a = 2,326$

$$k_e = 1 - 0,08 (2,326)$$

$$k_e = 0,81$$

**Entonces se tiene que:**

$$S_e = 0,89 (1,02) (1) (1) (0,81) (220)$$

$$S_e = 165,12 \text{ MPa}$$

La resistencia a la fatiga máxima se calcula, tomando en cuenta el valor de  $f$  de la **Figura 1.3**.

$$fS_{ut} = 0,9 (440)$$

$$fS_{ut} = 396 \text{ MPa}$$

Se determinan los valores de  $a$  y  $b$ , según las ecuaciones 1.4 y 1.5.

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S_e} \qquad b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{fS_{ut}}{S_e} \right)$$

$$a = \frac{(396)^2}{165,12} \qquad b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{396}{165,12} \right)$$

$$a = 949,67$$

$$b = -0,126$$

Se procede a calcular la resistencia a fatiga del acero AISI 1018 con la ecuación 1.3 para un número de ciclos dado:

$$S_f = aN^b$$

$$S_f = 949,67 (2000)^{-0,126}$$

$$S_f = 362,72 \text{ MPa}$$

Mediante la ecuación 2.18 se procede a calcular la carga teórica a la que se produce la rotura de la probeta.

$$Q = \frac{a N^b \pi (d_{probeta})^3}{16 d_{AB}}$$

$$Q = \frac{949,67 (2000)^{-0,126} \pi (6)^3}{16 (156)}$$

$$Q = 98,56 N$$

A través de la ecuación 2.19 se determina el tiempo teórico que tardará en romperse la probeta, considerando las RPM del motor.

$$RPM_{motor} = 1745$$

$$t_t = \frac{N}{RPM_{motor}}$$

$$t_t = \frac{2000}{1745}$$

$$t_t = 1,14 \text{ min}$$

**Tabla 3.2** Valores teóricos de esfuerzo a fatiga

Carga (N)	T (min)	N (ciclos)	$S_f$ (Mpa)		
			$k_f = 1$	$k_f = 1,1$	$k_f = 1,3$
100,00	1,02	1784	368,01	370,96	376,19
90,00	2,35	4100	331,21	337,72	349,44
80,00	5,95	10390	294,42	304,08	321,79
70,00	17,09	29830	257,61	269,97	293,07
67,45	22,92	40000	248,22	261,18	285,55

En la **Tabla 3.2** se muestran los valores teóricos de resistencia a fatiga del acero Aisi 1018 sometido a diferentes cargas.

Se compara los esfuerzos teóricos con los obtenidos experimentalmente para determinar el error en cada ensayo.

$$\% \varepsilon = \frac{|S_f - S_{fe}|}{S_f} \times 100\% \quad [3.1]$$

$$\%_{\varepsilon} = \frac{|332,24 - 301,37|}{332,24} \times 100\%$$

$$\%_{\varepsilon} = 9,3 \%$$

Se obtiene el % de error promedio para los valores de los ensayos realizados con las distintas rugosidades del material.

$$\%_{\varepsilon_{prom}} = \frac{\sum \varepsilon \%}{n} \quad [3.2]$$

$$\%_{\varepsilon_{prom}} = \frac{17,01 + 9,01 + 0,95 + 7,72}{4}$$

$$\%_{\varepsilon_{prom}} = 8,67$$

### 3.4 RESULTADOS DE ENSAYOS

Para comprobar el buen funcionamiento de la máquina y sus componentes electrónicos se realizó pruebas de ensayo en diferentes condiciones:

- Ensayos sin carga
- Ensayos con carga

#### 3.4.1 ENSAYOS SIN CARGA

Estas pruebas se realizaron con el fin de comprobar el funcionamiento de la máquina y sus componentes durante los ensayos, además, para descartar la existencia de tensiones externas al sistema de carga, que provoquen la rotura de la probeta en un número de ciclos demasiado bajos.

De esta manera, respecto a los resultados obtenidos sin carga, la duración de las probetas sometidas a los ensayos bajo estas condiciones superó los 40 minutos antes de la rotura. Es así que durante estos ensayos se superó los 65000 ciclos, lo cual comprende un régimen de ciclos alto.

#### 3.4.2 ENSAYOS CON CARGA

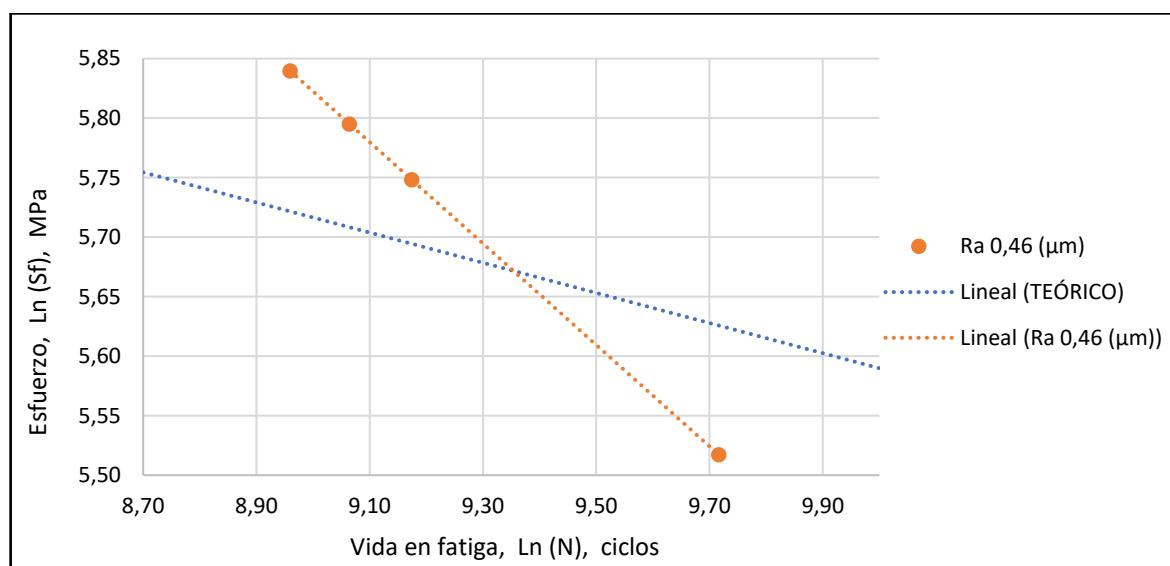
Los ensayos se realizaron a diferentes cargas, en total 12 ensayos que se clasifican en 3 grupos correspondientes a distinta rugosidad.

Se procedió a realizar los ensayos en las probetas pulidas con lija 120, que determinó un valor de rugosidad  $R_a = 0,46 (\mu m)$ . Como indica la **Tabla 3.3**.

**Tabla 3.3** Resultados de ensayos con rugosidad  $0,46 (\mu m)$

N° ensayo	Carga (N)	T (min)	N(ciclos)	$S_{fe}$ (Mpa)	% error
1	100	5	7780	330,15	12,24
2	90	5,8	8640	327,10	6,39
3	80	7,3	9645	323,92	0,66
4	70	10,19	16585	308,73	5,34
<b>% Error promedio</b>					6,16

Se procede a graficar los resultados obtenidos con los valores en escala logarítmica como se muestra en la **Figura 3.2**.



**Figura 3.2** Diagrama S-N logarítmico, con probetas de rugosidad  $R_a 0,46 (\mu m)$

Posteriormente se procedió a realizar los ensayos en las probetas pulidas con lija 60, que determinó un valor de rugosidad  $R_a = 1,19 (\mu m)$ . Como indica la **Tabla 3.4**.

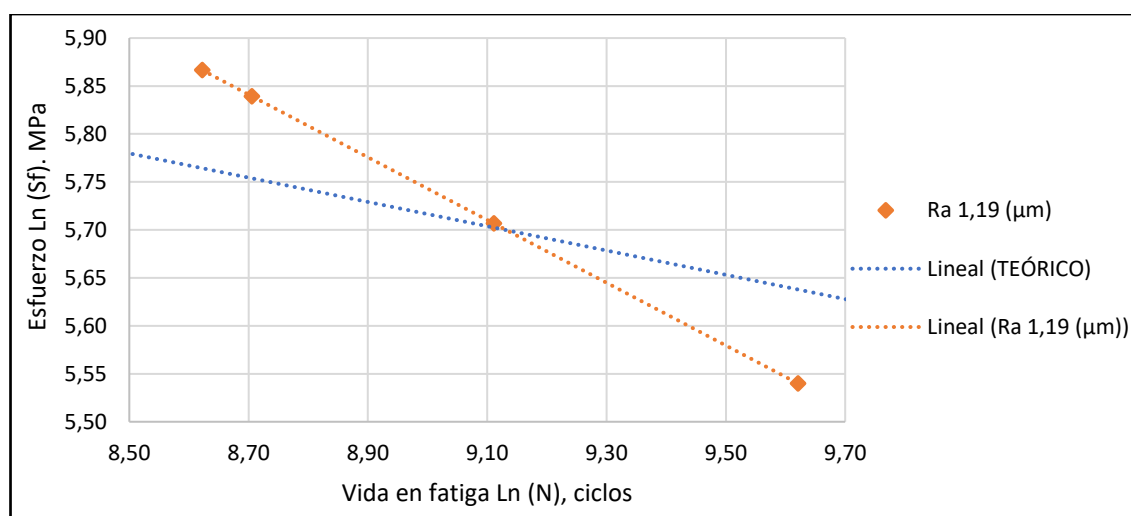
**Tabla 3.4** Resultados de ensayos con rugosidad  $1,19 (\mu m)$

N° ensayo	Carga (N)	T (min)	N (ciclos)	$S_{fe}$ (Mpa)	% error
1	100	3,33	5554	326,35	12,03



2	90	3,14	6035	323,30	4,27
3	80	5,8	9056	308,83	1,56
4	70	9,16	15079	291,57	8,00
<b>% Error promedio</b>					6,46

Se construye el diagrama S-N con los valores de los resultados obtenidos en escala logarítmica. Como se muestra en la **Figura 3.3**.



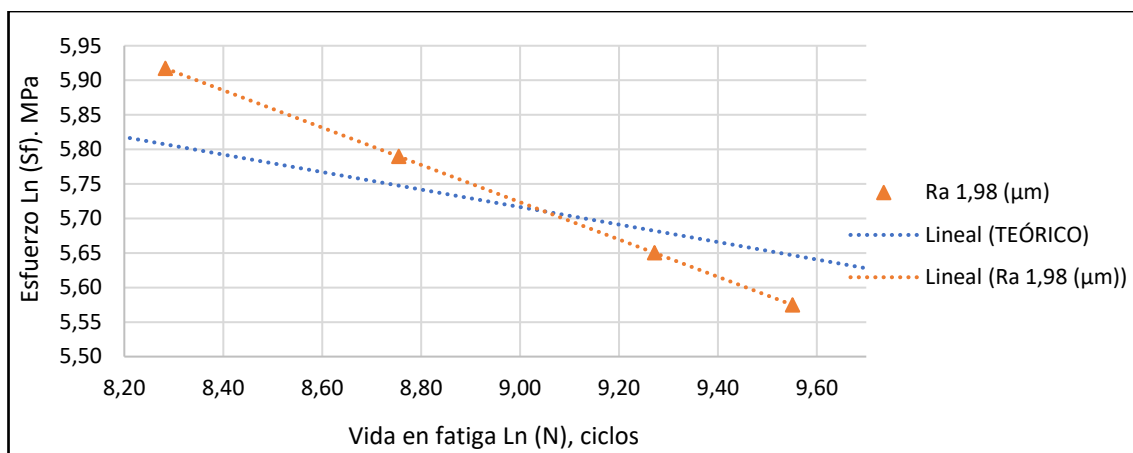
**Figura 3.3** Diagrama S-N logarítmico, con probetas de rugosidad Ra 1,19 ( $\mu\text{m}$ )

A continuación, se procedió a realizar los ensayos en las probetas pulidas con lija 30, que determinó un valor de rugosidad Ra = 1,98 ( $\mu\text{m}$ ). Como indica la **Tabla 3.5**.

**Tabla 3.5** Resultados de ensayos con rugosidad 1,98 ( $\mu\text{m}$ )

N° ensayo	Carga (N)	T (min)	N (ciclos)	$S_{fe}$ (Mpa)	% error
1	100	2,15	3956	332,71	9,59
2	90	3,31	6343	313,40	5,38
3	80	7,23	10633	293,56	0,29
4	70	8,54	14058	283,36	9,99
<b>% Error promedio</b>					6,31

Se elabora el diagrama S-N utilizando los valores de los resultados obtenidos en escala logarítmica. Como se muestra en la **Figura 3.4**.

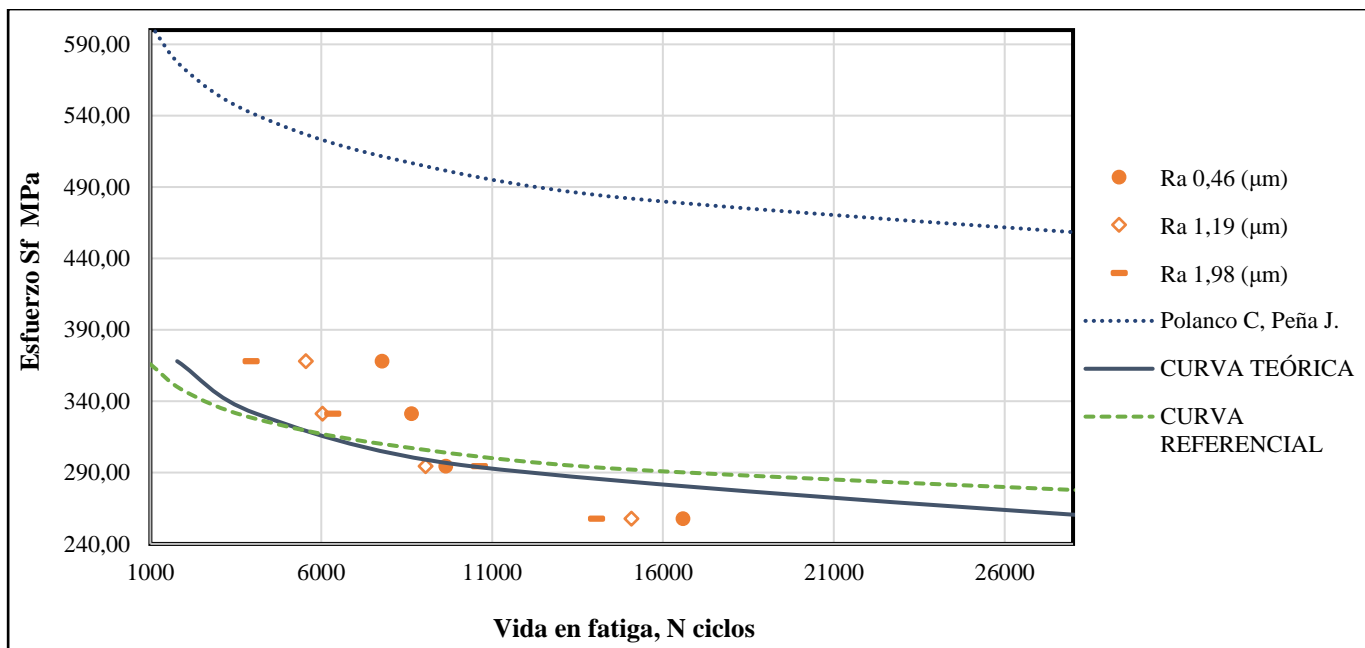


**Figura 3.4** Diagrama S-N logarítmico, con probetas de rugosidad Ra 1,98 (µm)

Comparación de los ciclos de vida en fatiga de cada probeta con los diferentes grados de rugosidad en la **Tabla 3.6**.

**Tabla 3.6** Comparación de ciclos de vida de probetas con diferente rugosidad

Carga (N)	N (ciclos) Ra=0,46	N (ciclos) Ra=1,19	N (ciclos) Ra=1,98	Diferencia de vida entre rugosidad 0,46 y 1,19 (%)	Diferencia de vida entre rugosidad 0,46 y 1,98 (%)	Diferencia de vida entre rugosidad 1,19 y 1,98 (%)
100,00	7780	5554	3956	28,61	49,15	28,77
90,00	8640	6035	6343	30,15	26,59	5,10
80,00	9645	9056	10633	6,11	10,24	17,41
70,00	16585	15079	14058	9,08	15,24	6,77



**Figura 3.5** Comparación de curvas S-N teóricas con resultados obtenidos experimentalmente

### 3.4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

-En los diagramas S-N en escala logarítmica se observa que el comportamiento de los datos experimentales correspondientes a cada rugosidad marca tendencia similar a la línea teórica, pero con ciertas desviaciones en pendiente de la recta y en el número de ciclos.

-El porcentaje de error promedio de los resultados experimentales en cada rugosidad, se puede observar que no supera el 10%, lo cual es un valor aceptable.

-La ecuación  $Sf = -44,92 \ln(N) + 914,04$  construye la curva referencial para el acero AISI 1018 y ha sido obtenida de [62]. La cual posee similar tendencia que la curva teórica. Además, en la **Figura 3.5**, se observa que los valores experimentales se acercan a la curva teórica y marcan una tendencia semejante a las curvas teóricas y referencial.

-En la **Figura 3.5** se puede observar que la curva teórica y referencial muestran coherencia, ya que poseen similar tendencia, representan al diagrama S-N del acero AISI 1018, sin embargo, cabe destacar que difieren en valores del esfuerzo Sf, debido a que el Sut (726 MPa) que se obtuvo experimentalmente en la investigación de [62] es mucho mayor al valor teórico (440 MPa) mismo que se utilizó para obtener resultados de este trabajo de investigación.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- Conforme al objetivo principal y partiendo de un diseño mecánico propuesto previamente, se optó por un variador de frecuencia para modificar la velocidad del motor. Este método es comúnmente utilizado en la industria y simplificó tanto la adquisición de los equipos para el sistema de control como su proceso de instalación.
- Se implementó un sistema de control automático muy accesible, diseñado para que el operador de la máquina pueda ingresar los valores de velocidad y carga necesarios para realizar los ensayos a fatiga correspondientes.
- Se observó que el sistema de carga original era inestable, generando una variación en la carga aplicada a la probeta. Por este motivo se decidió cambiar el sistema de carga por uno que permite la aplicación estable y precisa de una fuerza horizontal. Los resultados muestran lo beneficioso de este cambio ya que además de facilitar la aplicación de la carga también mejora la precisión y fiabilidad de resultados.
- Se realizaron pruebas de fatiga en probetas con tres rugosidades diferentes correspondientes a distintas granulaciones de lija. Se obtuvieron resultados experimentales que muestran tendencias similares entre sí, pero que evidencian que a mejor acabado superficial la vida en fatiga aumenta. Esto debido a que las superficies más rugosas contienen concentradores de tensión que provocan la falla prematura del material.
- El error promedio del esfuerzo de resistencia a fatiga en las probetas ensayadas no supera el 10% respecto a los valores teóricos, lo cual se encuentra dentro de un margen aceptable. Sin embargo, en el caso de los ciclos el error puede aumentar en comparación de los ciclos teóricos, en condiciones de régimen de fatiga a bajos ciclos que comprende ciclos menores a  $10^3$ .

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Antes de utilizar la máquina se recomienda la revisión del manual de usuario que se encuentra en el **Anexo V**.
- Es recomendable revisar el estado de los componentes tanto mecánicos como eléctricos y realizar el debido mantenimiento antes de realizar los ensayos, para así, alargar la vida útil de la máquina.
- Se recomienda usar probetas normalizadas en base a la norma ASTM E606 para realizar los ensayos. Además, queda abierta la posibilidad de que se ensayen distintos tipos de material con fines investigativos.
- Se sugiere implementar más máquinas de este tipo, que permitan a la comunidad académica el estudio y la investigación de las propiedades de los materiales utilizados en la industria.
- Para obtener resultados más exactos, se sugiere obtener experimentalmente el valor de resistencia última a tracción ( $S_{ut}$ ), del material a ensayar. A pesar de que este valor lo da el fabricante en las especificaciones del material, este puede variar dependiendo de múltiples parámetros, tal como el lote del material ensayado, por ejemplo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. M. Majó, “Fatiga en materiales compuestos : comportamiento y mecanismos de degradación,” *Estud. Const. Mater. compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas*, pp. 1–32, 2010, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/94171/02CAPITULO.pdf?sequence=3>
- [2] A. Levinson, “Fracturas por Fatiga,” 2017. <https://www.aceroslevinson.com/2017/03/fracturas-por-fatiga/>
- [3] E. Secretaria Nacional de Planificacion, *Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado*. 2021, pp. 43-48-85–90.
- [4] F. T. Methods, “Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment,” *Stand. Frett. Fatigue Test Methods Equip.*, 1992, doi: 10.1520/stp1159-eb.
- [5] L. A. P. Zapana Mamani, “Universidad Católica de Santa María Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales Escuela Profesional de Ingeniería de Minas,” Universidad Católica de Santa María, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/11499>
- [6] K. J. BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, no. 1. 2014. [Online]. Available: <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2015/03/disec3b1o-en-ingenierc3ada-mecc3a1nica-de-shigley-8-edicic3b3n-budynas.pdf>
- [7] J. García, “Límite ideal de fatiga,” 2022. [http://www.mecapedia.uji.es/pages/limite\\_ideal\\_de\\_fatiga.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/limite_ideal_de_fatiga.html) (accessed Feb. 10, 2023).
- [8] D. Zeng *et al.*, “Fatigue strength evaluation of scale railway axle with surface defect

- considering mean stress effect,” *Int. J. Fatigue*, vol. 177, no. August, p. 107974, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107974.
- [9] J. García, “Criterio de Goodman,” 2022. [http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio\\_de\\_Goodman.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_Goodman.html) (accessed Feb. 10, 2023).
- [10] R. Pelesoni and P. Vicig, “The Goodman-Nguyen relation within imprecise probability theory,” *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 55, no. 8, pp. 1694–1707, 2014, doi: 10.1016/j.ijar.2014.06.002.
- [11] I. Goodman and H. Nguyen, “Conditional objects and the modeling of uncertainties,” pp. 119–138, 1988, [Online]. Available: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Conditional objects and the modeling of uncertainties&publication\\_year=1988&author=I.R. Goodman&author=H.T. Nguyen#d=gs\\_cit&t=1700696001290&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3Az8Ettj-BR4sJ%3Ascholar.google.com%2F%26ou](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Conditional+objects+and+the+modeling+of+uncertainties&publication_year=1988&author=I.R.+Goodman&author=H.T.+Nguyen#d=gs_cit&t=1700696001290&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3Az8Ettj-BR4sJ%3Ascholar.google.com%2F%26ou)
- [12] S. Kikuchi, K. Minamizawa, T. Ogi, K. Ono, T. Yoshimura, and M. Ijiri, “Effect of multifunction cavitation on rotating bending fatigue properties of steel rods and its fatigue limit estimation,” *Int. J. Fatigue*, vol. 176, no. July, p. 107852, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107852.
- [13] J. García, “Criterio de Goodman modificado,” 2022. [http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio\\_de\\_Goodman\\_modificado.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_Goodman_modificado.html) (accessed Feb. 10, 2023).
- [14] P. Hariprasath, P. Sivaraj, V. Balasubramanian, S. Pilli, and K. Sridhar, “Influence of stress ratio on fatigue behaviour of gas metal arc welded naval grade HSLA steel joints: Assessment of safe and unsafe region for ship hull fabrication,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 148,

- no. March, p. 107216, 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107216.
- [15] I. Weich, T. Ummenhofer, T. Nitschke-Pagel, H. E. Chalandar, and K. Dilger, “Fatigue behaviour of welded high-strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments,” *Weld. World*, vol. 53, no. 11–12, pp. 322–332, 2009, doi: 10.1007/BF03263475.
- [16] P. D. Toasa Caiza, S. Sire, T. Ummenhofer, and Y. Uematsu, “Low cost estimation of Wöhler and Goodman–Haigh curves of Ti-6Al-4V samples by considering the stress ratio effect,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 45, no. 2, pp. 441–450, 2022, doi: 10.1111/ffe.13607.
- [17] M. Mora, “Criterio de Soderberg,” 2022. [http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio\\_de\\_Soderberg.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_Soderberg.html) (accessed Feb. 10, 2023).
- [18] W. Qiudong, W. Libin, J. Bohai, and F. Zhongqiu, “Modified effective notch stress method for fatigue evaluation of rib-deck welds integrating the critical distance approach,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 196, no. June, p. 107373, 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107373.
- [19] E. A. Badr and J. Ishak, “High-cycle fatigue behavior of type 4340 steel pressurized blocks including mean stress effect,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 194, no. PB, p. 104535, 2021, doi: 10.1016/j.ijpvp.2021.104535.
- [20] J. García, “Criterio de Gerber,” 2022. [http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio\\_de\\_Gerber.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_Gerber.html) (accessed Feb. 10, 2023).
- [21] J. García, “Criterio de resistencia a fatiga para tensiones medias negativas,” 2022. [http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio\\_de\\_resistencia\\_a\\_fatiga\\_para\\_tensiones\\_medias\\_negativas.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/criterio_de_resistencia_a_fatiga_para_tensiones_medias_negativas.html) (accessed Feb. 10, 2023).
- [22] Q. Zou and J. Wen, “Bayesian model averaging for probabilistic S-N curves with



- probability distribution model form uncertainty,” *Int. J. Fatigue*, vol. 177, no. June, p. 107955, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107955.
- [23] S. A. Shipilov, “Stress corrosion cracking, corrosion fatigue and hydrogen embrittlement research: Conferences, 1944-1999,” *Environ. Induc. Crack. Met. M. Elboujdaini, E. Ghali W. Zheng, Eds., Metall. Soc. CIM, Montr.*, no. August 2000, pp. 121–148, 2000, doi: 340610795.
- [24] R. Little, “STATISTICAL PLANNING AND ANALYSIS,” in *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*, 1975, pp. 16–31. [Online]. Available: [https://www.google.com.ec/books/edition/Manual\\_on\\_Statistical\\_Planning\\_and\\_Analy/4PhhUhoYs2EC?hl=es&gbpv=1&dq=inauthor:%22Robert+Eugene+Little%22&printsec=frontcover](https://www.google.com.ec/books/edition/Manual_on_Statistical_Planning_and_Analy/4PhhUhoYs2EC?hl=es&gbpv=1&dq=inauthor:%22Robert+Eugene+Little%22&printsec=frontcover)
- [25] L. Vanegas, “Capítulo 5 teoría de fatiga,” 2016. [Online]. Available: [https://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2016/09/PresCap5\\_Fatiga.pdf](https://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2016/09/PresCap5_Fatiga.pdf)
- [26] P. Sanhueza, “ANÁLISIS EN PRO / ENGINEER DE UN EJE DE MOTOR Y CONSTITUCIÓN PLANTA VALDIVIA Y POSTERIOR,” UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE, 2007. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40788901/bmfcis226a-libre.pdf?1450307323=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DBmfcis226a.pdf&Expires=1676558318&Signature=Pn~DTnf0l06~fm47HDrjkzqPFDDkzR6sXfdJPdUe4H3iP6jJMi0fxQD-1LeFvra8GYcSlGKBnF1z9~G8>
- [27] F. Cuichàn and W. Dueñas, “REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE VIGA ROTATORIA SOMETIDA A FLEXIÓN PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A

- LA FATIGA,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1023/1/CD-1462%282008-05-22-08-41-30%29.pdf>
- [28] V. Gómez, “Metales No Ferrosos Aluminio – Cobre – Cinc - Estaño,” *Univ. Tecnológica Nac.*, 2002, [Online]. Available: [http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/mecanica/Metales no Ferrosos, Alumnos.pdf](http://www.frt.utn.edu.ar/tecnoweb/imagenes/file/mecanica/Metales_no_Ferrosos_Alumnos.pdf)
- [29] A. Burr *et al.*, “A numerical framework to predict the fatigue life of lattice structures built by additive manufacturing,” *Int. J. Fatigue*, vol. 139, no. March, p. 105769, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105769.
- [30] G. Luz, “Comprender La Carga Axial En Ingeniería,” 2023. <https://eng.gelsonluz.com/es/comprender-la-carga-axial-en-ingeniería-es.html>
- [31] Y. Jia *et al.*, “Fatigue life prediction based on a deep learning method for Ti-6Al-4V fabricated by laser powder bed fusion up to very-high-cycle fatigue regime,” *Int. J. Fatigue*, vol. 172, no. March, p. 107645, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107645.
- [32] N. Konda, R. Verma, and R. Jayaganthan, “Machine learning based predictions of fatigue crack growth rate of additively manufactured ti6al4v,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/met12010050.
- [33] A. Tridello, C. Boursier Niutta, F. Berto, G. Qian, and D. S. Paolino, “Fatigue failures from defects in additive manufactured components: A statistical methodology for the analysis of the experimental results,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 44, no. 7, pp. 1944–1960, 2021, doi: 10.1111/ffe.13467.
- [34] P. Zhao, T. Y. Lu, J. G. Gong, F. Z. Xuan, and F. Berto, “A strain energy density based life

- prediction model for notched components in low cycle fatigue regime,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 193, no. May, p. 104458, 2021, doi: 10.1016/j.ijpvp.2021.104458.
- [35] W. Li *et al.*, “Effect of elevated temperature on high-cycle and very-high-cycle fatigue properties of Ni-based superalloy manufactured by selective laser melting,” *Int. J. Fatigue*, vol. 148, no. December 2020, p. 106250, 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106250.
- [36] Z. Qin *et al.*, “Crack initiation mechanisms and life prediction of GH4169 superalloy in the high cycle and very high cycle fatigue regime,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 26, pp. 720–736, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.196.
- [37] K. Yang, Q. Huang, Q. Wang, and Q. Chen, “Competing crack initiation behaviors of a laser additively manufactured nickel-based superalloy in high and very high cycle fatigue regimes,” *Int. J. Fatigue*, vol. 136, no. March, p. 105580, 2020, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105580.
- [38] W. H. David, “Fretting fatigue considerations in holistic structural integrity based design processes (HOLSIP) - A continuing evolution,” *Tribol. Int.*, vol. 44, no. 11, pp. 1364–1370, 2011, doi: 10.1016/j.triboint.2011.01.001.
- [39] S. P. Zhu, Y. Ai, D. Liao, J. A. F. O. Correia, A. M. P. De Jesus, and Q. Wang, “Recent advances on size effect in metal fatigue under defects: a review,” *Int. J. Fract.*, vol. 234, no. 1–2, pp. 21–43, 2022, doi: 10.1007/s10704-021-00526-x.
- [40] J. Mentira, “Acabado Superficial.” <https://www.runsom.com/es/blog/surface-finish-and-surface-roughness-chart/>
- [41] S. Poveda, “Acabados Superficiales,” *Vis. Graph. Gr.*, p. 69, 2001, [Online]. Available: [http://ocw.upm.es/pluginfile.php/1336/mod\\_label/intro/acabados.pdf](http://ocw.upm.es/pluginfile.php/1336/mod_label/intro/acabados.pdf)
- [42] SYDLE, “Automatización de procesos.” <https://www.sydle.com/es/blog/automatizacion->

de-procesos-6070ae4c9b901904c4349dcb

- [43] Q. Patricio Alcocer, M. C. Zurita, N. C. Zambrano, and L. M. Esthela, “Automatización de los procesos industriales,” *J. Bus. Entrep. Stud.*, pp. 123–131, 2018, [Online]. Available: <http://herramientas.camaramedellin.com.co/Inicio/Buenaspracticasesempresariales/BibliotecaProducciónyOperaciones/Automatizacióndelosprocesosindustriales.aspx>
- [44] J. Colomer, “Estudio de los Sensores para la Detección de Obstáculos Aplicables a Robots Móviles,” *Univ. Oberta Catalunya*, pp. 24–63, 2018, [Online]. Available: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/80846/6/jacobarTFM0618memoria.pdf>
- [45] M. A. Sehr *et al.*, “Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 17, no. 5, pp. 3523–3533, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3007764.
- [46] E. Pérez-López, “Los sistemas SCADA en la automatización industrial,” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 28, no. 4, p. 3, 2015, doi: 10.18845/tm.v28i4.2438.
- [47] R. Salazar, “SIMULACIÓN DE DOS SISTEMAS DE CONTROL INDUSTRIAL MEDIANTE CONTROL LÍNEA A TRAVÉS DE UNA INTERFAZ HUMANO MÁQUINA HMI,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- [48] M. Ángel and R. Pozueta, “Máquinas asincrónicas o de inducción,” p. 278, 2018, [Online]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- [49] H. McGraw, “Motores eléctricos 11,” *Mot. eléctricos*, vol. 1, p. 20, 2011, [Online]. Available: <https://bit.ly/3D0FeKh>
- [50] R. Aranz and J. García, “Métodos de control de motores de inducción: síntesis actual,” vol. 13, 2016.

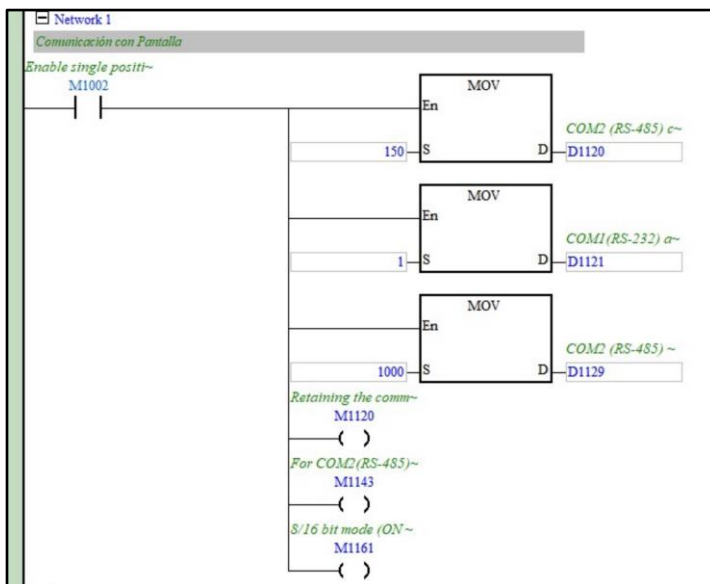
- [51] M. Moderna, “No Title.” [https://mecmod.com/metodos-de-variacion-de-velocidad-en-motores-asincronos/#:~:text=Método 2%3A variación del deslizamiento \(s\).&text=Se basa en el hecho,en los devanados del rotor.](https://mecmod.com/metodos-de-variacion-de-velocidad-en-motores-asincronos/#:~:text=Método 2%3A variación del deslizamiento (s).&text=Se basa en el hecho,en los devanados del rotor.)
- [52] “Instituto politécnico nacional,” 2016.
- [53] J. Espinoza, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL CON LOS MÉTODOS ESCALAR Y VECTORIAL EMPLEADOS EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SU COMPORTAMIENTO EN ESTADO TRANSITORIO.,” 2017.
- [54] E. Holguín, “Control de velocidad vectorial lineal y no lineal para un motor de inducción sin sensor de velocidad,” 2018.
- [55] ASTM, “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.” <https://www.astm.org/e0466-15.html>
- [56] B. Manufacturing, P. M. Equipment, and C. Agents, “iTeh Standards,” *iTeh Stand.*, vol. 01, no. Reapproved, pp. 1–7, 2023, [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/50899458-622b-4b86-b3e9-bfa0755bc727/en-14427-2022>
- [57] S. CLARAMONTE, M. BERGANT, and A. YAWNY, “Ensayos de traccion en materiales metálicos para comparaciones interlaboratorios de Ensayos de Aptitud M-RT-02,” 2018, [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/50899458-622b-4b86-b3e9-bfa0755bc727/en-14427-2022>
- [58] SUMITEC, “ACERO GRADO MAQUINARIA.” <https://www.sumiteccr.com/acero/maquinaria/AM01.pdf>
- [59] Tecnopl, “PROGRAMACIÓN LADDER Y CONTACTOS ABIERTOS Y CERRADOS

- TIA PORTAL,” 2022. <https://www.tecnopl.com/programacion-ladder-y-contactos-abiertos-y-cerrados-tia-portal/> (accessed Dec. 02, 2023).
- [60] T. ILIMITADA, “4 mejores programas de PLC gratuitos para Windows.” <https://tecnologiailimitada.com/4-mejores-programas-de-plc-gratuitos-para-windows/>
- [61] H. Chávez and F. Coyago, “Universidad técnica del norte,” Universidad Técnica del Norte, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13799>
- [62] C. Polanco P. and J. Peña E., “Ensayo de Fatiga en Flexión Rotativa del Acero AISI-SAE 1018 por el Método Esfuerzo-Vida,” *Dsp. ESPOL*, vol. 1, no. September, pp. 1–8, 2011.

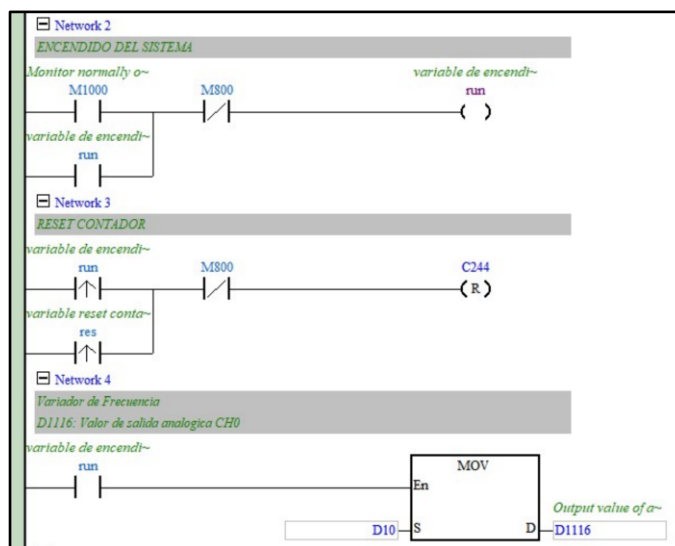
## **ANEXOS**

## ANEXO I

### DESCRIPCIÓN DE PROGRAMACIÓN

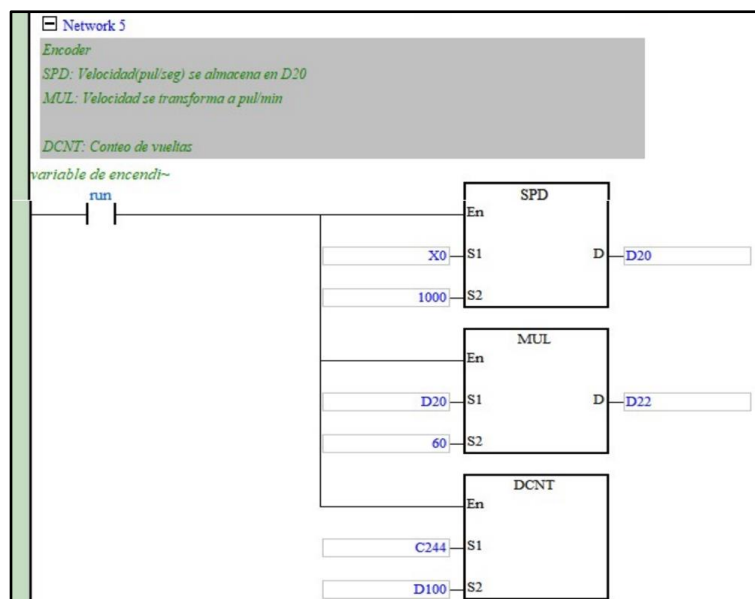


**Figura AI.1** Se muestra el primer segmento de la programación donde se inicia la comunicación de la pantalla con todo el sistema al ser energizado.

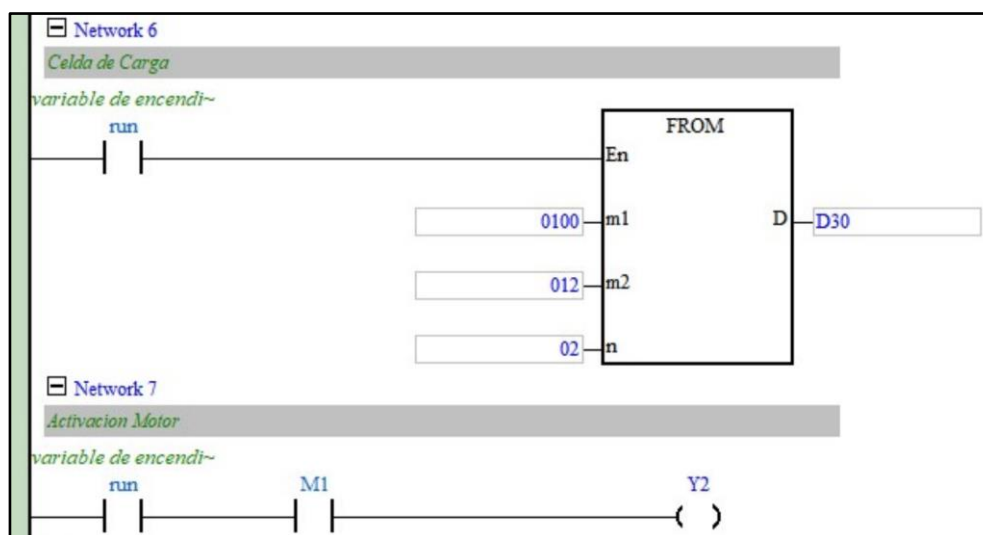


**Figura AI.2** Se muestra el encendido del sistema, reinicio del contador y por último el encendido del variador de frecuencia de igual manera cuentan con una variable de reset para reiniciar el contador.

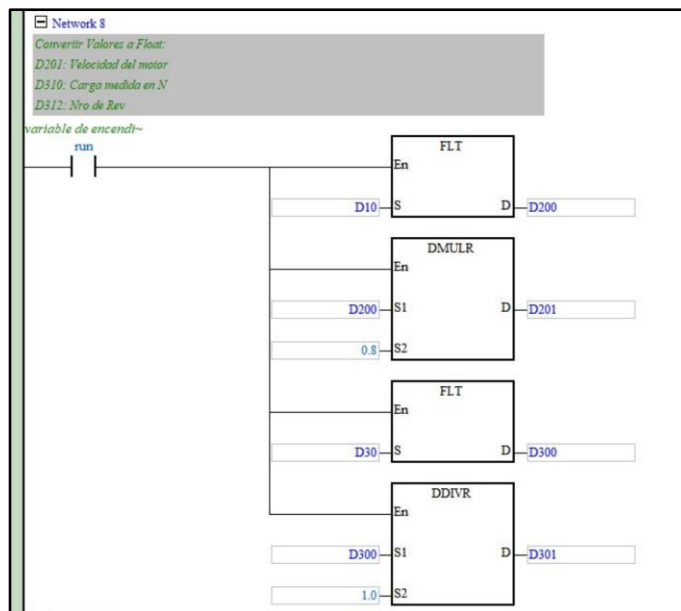




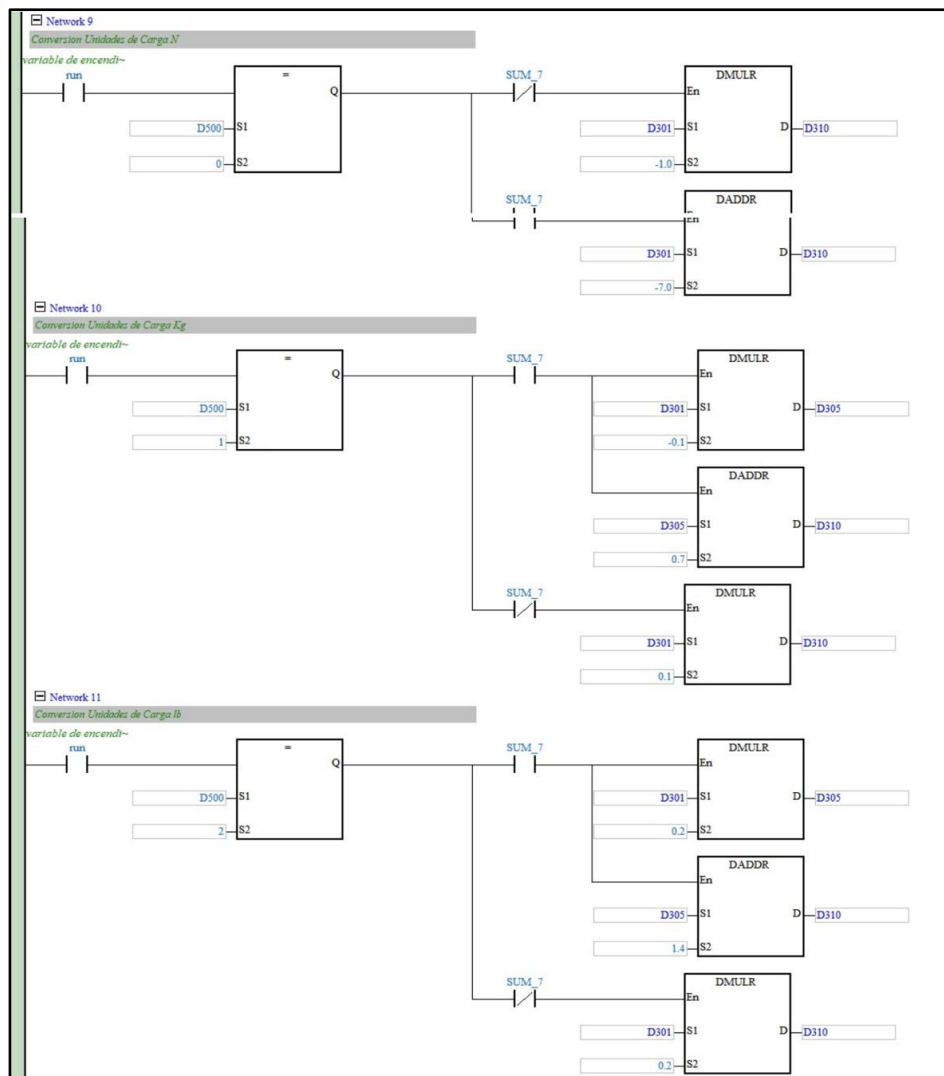
**Figura AI.3** Se presenta el segmento del contador de RPM, se realiza una transformación a pulsos/segundos para tener todo el tiempo el conteo de vueltas que realiza la probeta.



**Figura AI.4** Se puede ver la conexión de dos entradas analógicas las cuales corresponden a la celda de carga juntamente con un regulador para tener los valores dentro del rango requerido y mostrar la lectura digital en el HMI de igual manera el valor de carga empezar a medir al momento de encender el motor.



**Figura AI.5** Se observa la programación analógica que permite activar el motor a diferentes velocidades.



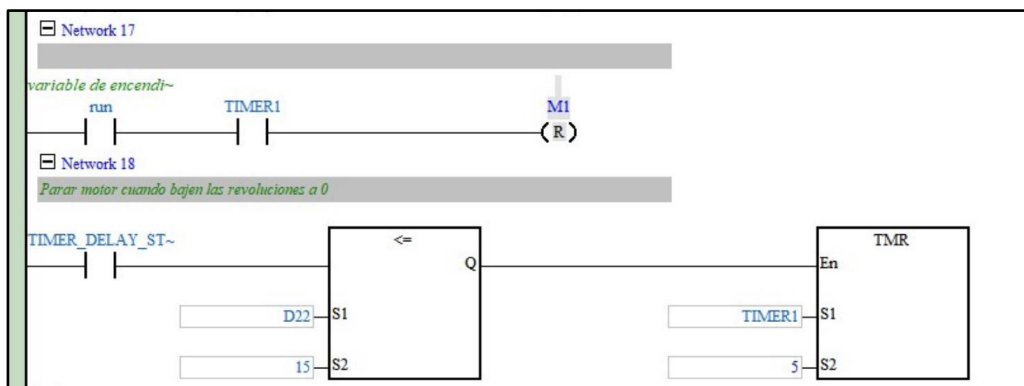
**Figura AI.6** Se indica las variables analógicas con la finalidad de convertirlas a un valor de fuerza, mismo valor que será utilizado para calcular el esfuerzo que es aplicado hacia la probeta. Se cuenta con 3 diferentes unidades de fuerza.



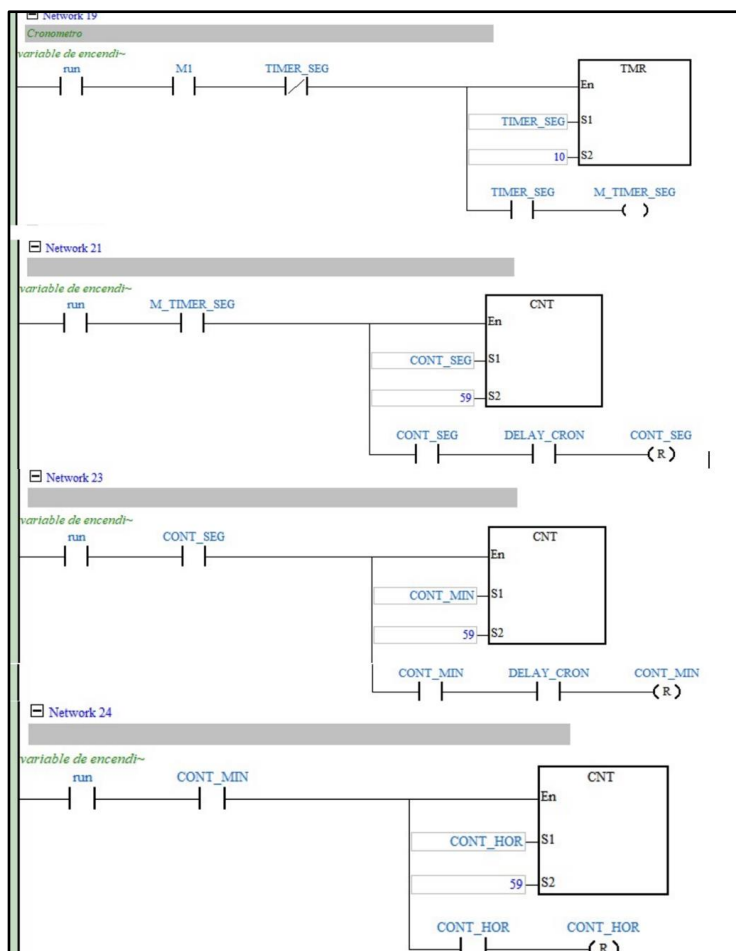
**Figura AI.7** Se tiene la activación del actuador en los dos sentidos ya sea de empuje como de contracción.



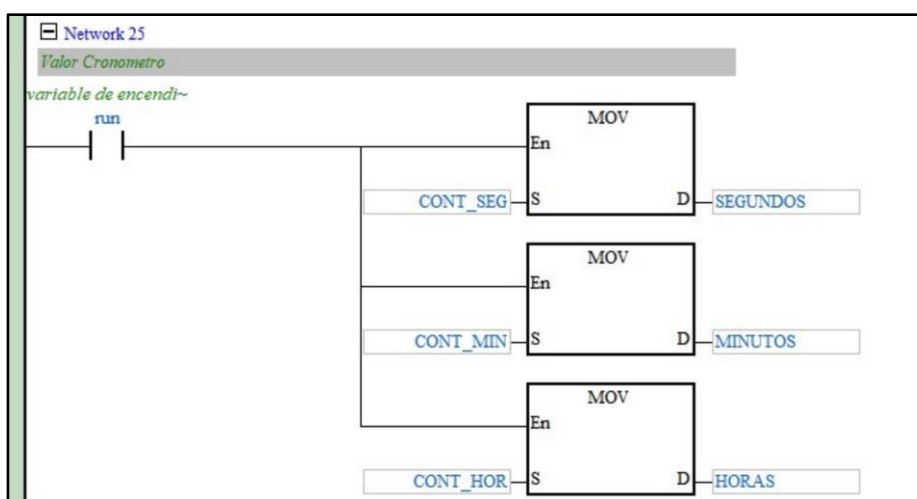
**Figura AI.8** Se tiene el temporizador para el paro del motor al momento que la probeta es rota.



**Figura AI.9** Se tiene el segmento de detención del motor cuando las revoluciones son diferentes y detienen al motor por completo.



**Figura AI.10** Se presenta el cronometro en horas, minutos y segundos de igual forma cuentan con una variable para reiniciar al momento de empezar un nuevo ensayo.





**Figura AI.11** La programación mostrada se encarga de contabilizar el tiempo del ensayo y de presentarlo en el HMI.

No.	Declaration Type	Identifiers	Address	Type	Initial Value	Identifier Comments
1	VAR	VAL_CARGA_IN	D300	REAL	0.0	
2	VAR	VAL_CARGA_REAL	D301	REAL	N/A	
3	VAR	VAL_CARGA_SHOW	D310	REAL	N/A	
4	VAR	VAL_AN_OUT	D200	REAL	0.0	
5	VAR	VAL_FREQ	D201	REAL	0.0	
6	VAR	TIMER1	T100	TIMER	N/A	
7	VAR	CARGA	D30	DWORD	0	
8	VAR	TIMER_SEG	T2	TIMER	N/A	
9	VAR	CONT_SEG	C0	COUNTER	N/A	
10	VAR	CONT_MIN	C1	COUNTER	N/A	
11	VAR	CONT_HOR	C2	COUNTER	N/A	
12	VAR	SEGUNDOS	D314	WORD	N/A	
13	VAR	MINUTOS	D316	WORD	N/A	
14	VAR	HORAS	D318	WORD	N/A	
15	VAR	TIMER_RESET	T3	TIMER	N/A	
16	VAR	DELAY_CRON	T4	TIMER	N/A	
17	VAR	M_TIMER_SEG	M250	BOOL	N/A	
18	VAR	TIMER_ACTUADOR	T5	TIMER	N/A	
19	VAR	TIMER_DELAY_STOP	T200	TIMER	N/A	
20	VAR	SUM_7	M210	BOOL	N/A	

**Figura AI.12** Se indica todos los valores de las variables asignadas a la memoria del HMI.

## ANEXO II

### ENSAYOS DE RUGOSIDAD N°60

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 2 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-B		

#### 3. PARÁMETRO DEL ENSAYO:

El ensayo se realizó con el equipo digital MITUTOYO, modelo SJ-210, bajo las especificaciones de la norma ASME B46.1 (2009) y en base a los requerimientos del cliente. En donde:

- La muestra fue entregada con la superficie pulida.
- Posteriormente la muestra se somete a un proceso de limpieza con agua, jabón y alcohol, para luego secarlas.
- Velocidad de avance 0.25 mm/s, longitud de onda ( $\lambda_c$ ) 0.8.
- El área de prueba fue seleccionada por el técnico del laboratorio, de acuerdo con las especificaciones del cliente, tal como se observa en la Figura N°1.
- Los resultados obtenidos en el ensayo se tomaron de acuerdo con requerimiento del cliente, se realizó 6 mediciones por cada muestra.
- Los resultados de ensayo se despliegan en los reportes emitidos por el equipo.

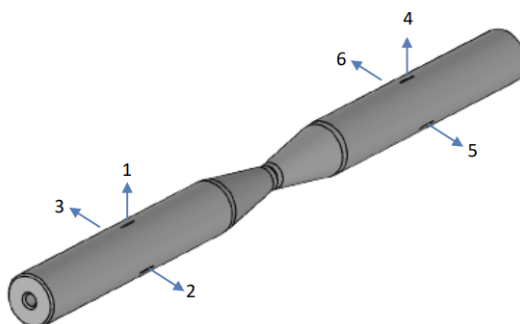


Figura N° 1. Bosquejo del lugar de medición de rugosidad

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 3 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>RT-LMDF-0701</b>	
	N° P0659-23-B		

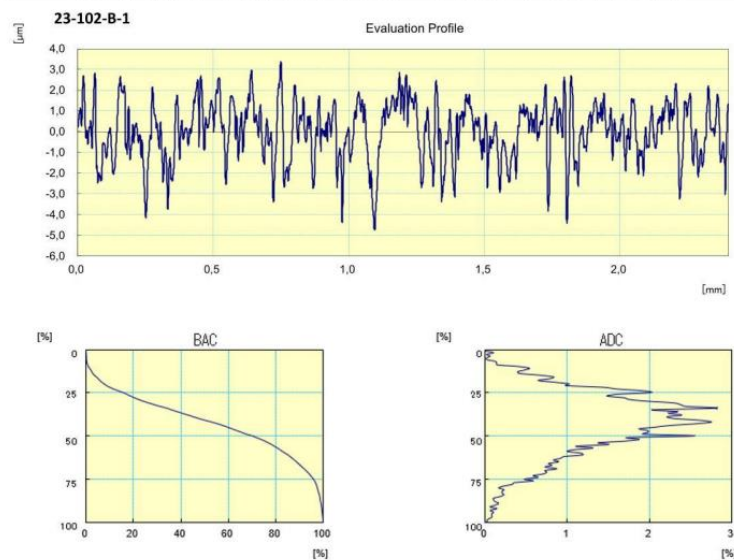
#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RUGOSIDAD

23-102-B

**Mitutoyo**

22-Nov-2023

### CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.108 µm		
Rq	1.387 µm		
Rz	7.393 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

**Figura AII.2** Informe de probeta con granulación N°60

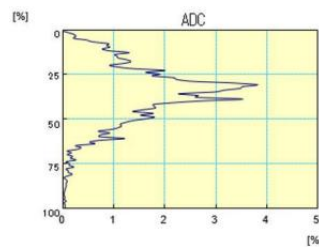
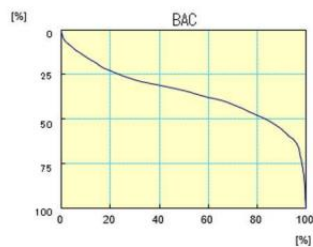
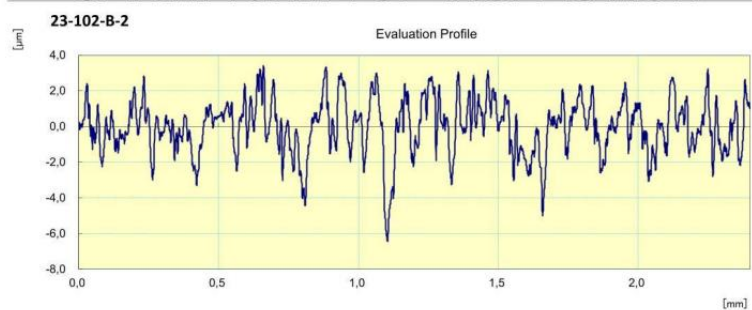


	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 4 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-B		

Mitutoyo

22- Nov -2023

## CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.186 µm		
Rq	1.517 µm		
Rz	8.448 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB  
 RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec  
 Quito-Ecuador

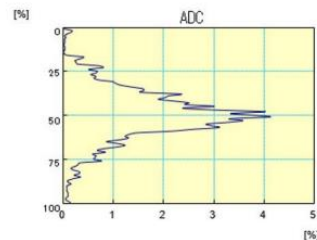
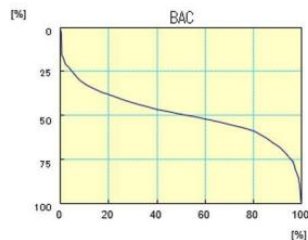
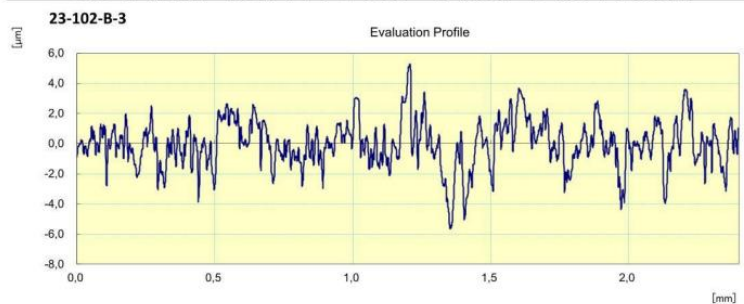
Figura AII.3 Informe de probeta con granulación N°60

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 5 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-B		
	(Empty space)		

Mitutoyo

22- Nov -2023



CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
As	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.174 µm		
Rq	1.546 µm		
Rz	8.484 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

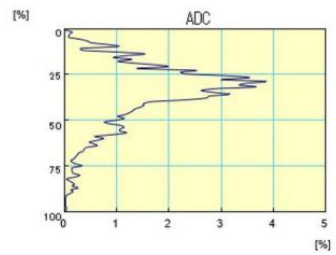
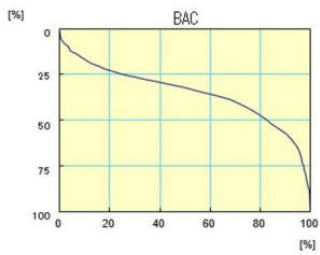
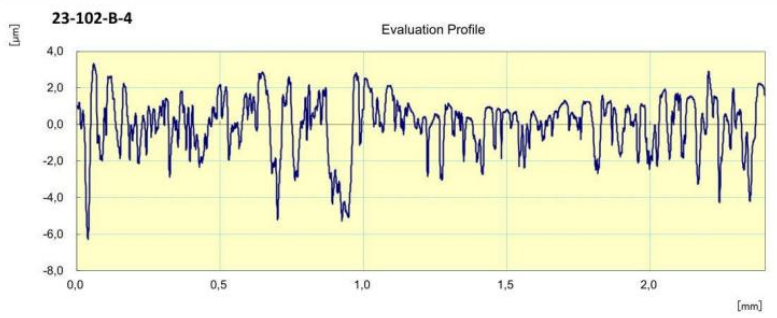
Figura AII.4 Informe de probeta con granulación N°60

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
	INFORME DE RESULTADOS N° P0659-23-B	Página: Pág. 6 de 9	

Mitutoyo

22- Nov -2023

# CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.187 µm		
Rq	1.547 µm		
Rz	8.283 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

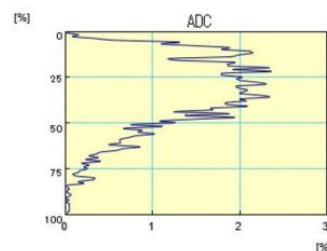
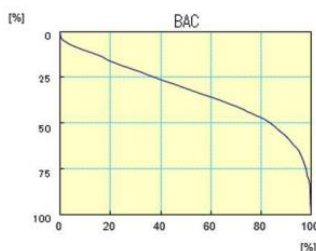
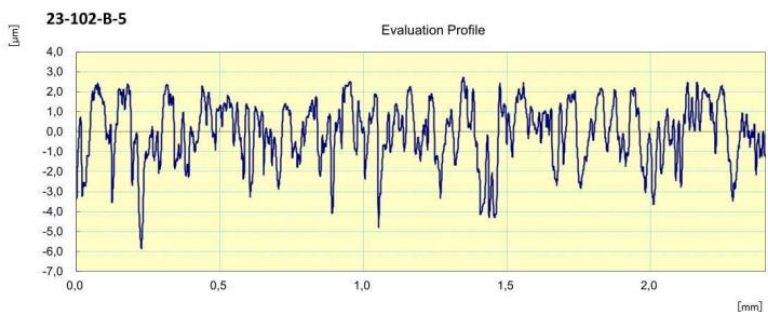
Figura AII.5 Informe de probeta con granulación N°60

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
	Página: Pág. 7 de 9		
	INFORME DE RESULTADOS N° P0659-23-B		

Mitutoyo

22- Nov -2023

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.235 µm		
Rq	1.531 µm		
Rz	7.287 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

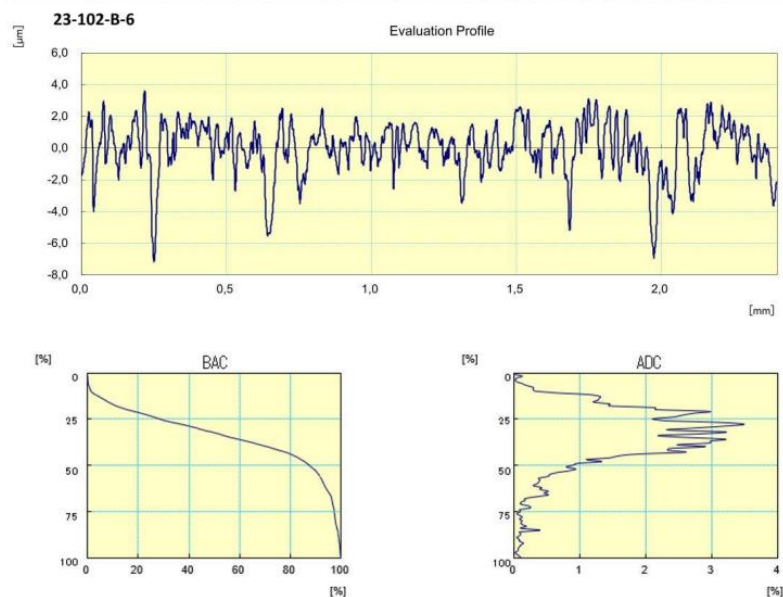
Figura AII.6 Informe de probeta con granulación N°60

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	 LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DESGASTE Y FALLA DEPARTAMENTO DE MATERIALES ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
		Fecha: 09/09/2019	
	Página: Pág. 8 de 9		
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>		<b>RT-LMDF-0701</b>	
N° P0659-23-B			

# Mitutoyo

22- Nov -2023

## CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.254 µm		
Rq	1.633 µm		
Rz	8.943 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

**Figura AII.7** Informe de probeta con granulación N°60

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° P0659-23-B	Fecha: 09/09/2019	
		Página: Pág. 9 de 9	
	RT-LMDF-0701		

**DECLARATORIA:**

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

**Atentamente:**

Informe

Elaborado por:



Ing. Andrés López

**Asistente del Laboratorio de Metalografía,  
Desgaste y Falla.**

Revisado y Aprobado por:



Ing. Patricia Proaño

**Responsable del Laboratorio de  
Metalografía, Desgaste y Falla.**



Nota: Se anexa 1 fotografía

**ANEXO FOTOGRAFÍCO**

**Fotografía N° 1.** Elemento 23-102-B, entregado en el laboratorio de metalografía, desgaste y falla para análisis.

## ANEXO III

### ENSAYOS DE RUGOSIDAD N°30

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	Revisión: 000	
	Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Fecha: 09/09/2019	
	INFORME DE RESULTADOS	Página: Pág. 2 de 9	
	N° P0659-23-A	RT-LMDF-0701	

#### 3. PARÁMETRO DEL ENSAYO:

El ensayo se realizó con el equipo digital MITUTOYO, modelo SJ-210, bajo las especificaciones de la norma ASME B46.1 (2009) y en base a los requerimientos del cliente. En donde:

- La muestra fue entregada con la superficie pulida.
- Posteriormente la muestra se somete a un proceso de limpieza con agua, jabón y alcohol, para luego secarlas.
- Velocidad de avance 0.25 mm/s, longitud de onda ( $\lambda_c$ ) 0.8.
- El área de prueba fue seleccionada por el técnico del laboratorio de acuerdo con las especificaciones del cliente, tal como se observa en la Figura N°1.
- Los resultados obtenidos en el ensayo se tomaron de acuerdo con requerimiento del cliente, se realizó 6 mediciones por cada muestra.
- Los resultados de ensayo se despliegan en los reportes emitidos por el equipo.

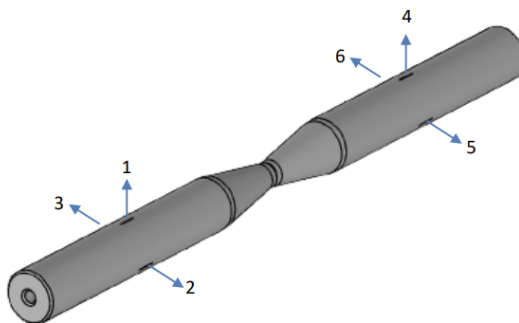


Figura N° 1. Bosquejo del lugar de medición de rugosidad

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 3 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-A		
	(Empty space)		

4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RUGOSIDAD

23-102-A

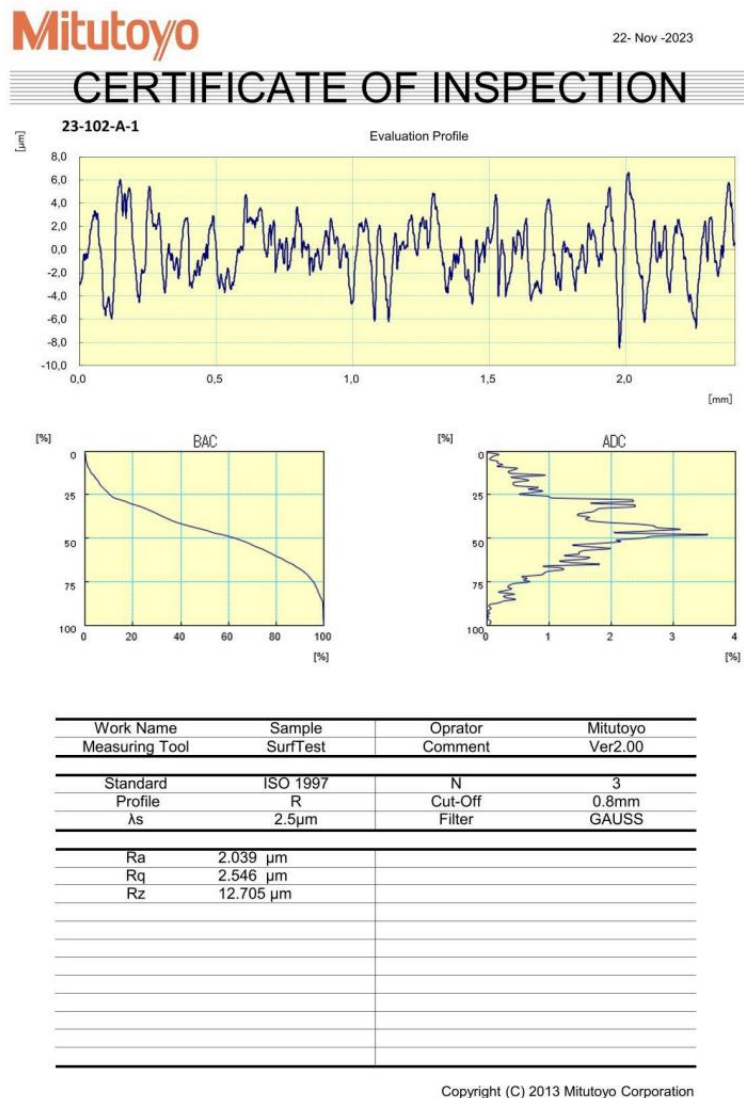


Figura AIII.2 Informe de probeta con granulación N°30

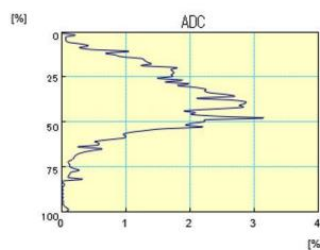
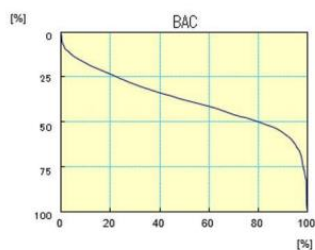
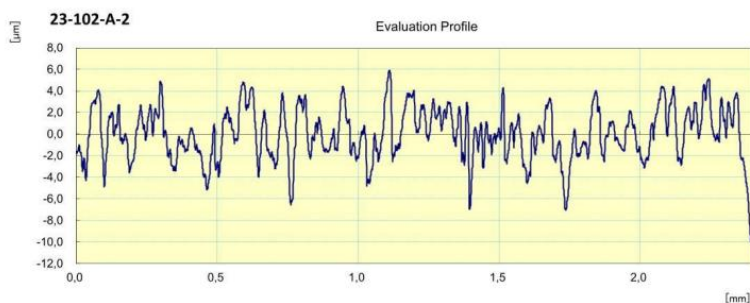


	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 4 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>RT-LMDF-0701</b>	
	N° P0659-23-A		



22- Nov -2023

## CERTIFICATE OF INSPECTION



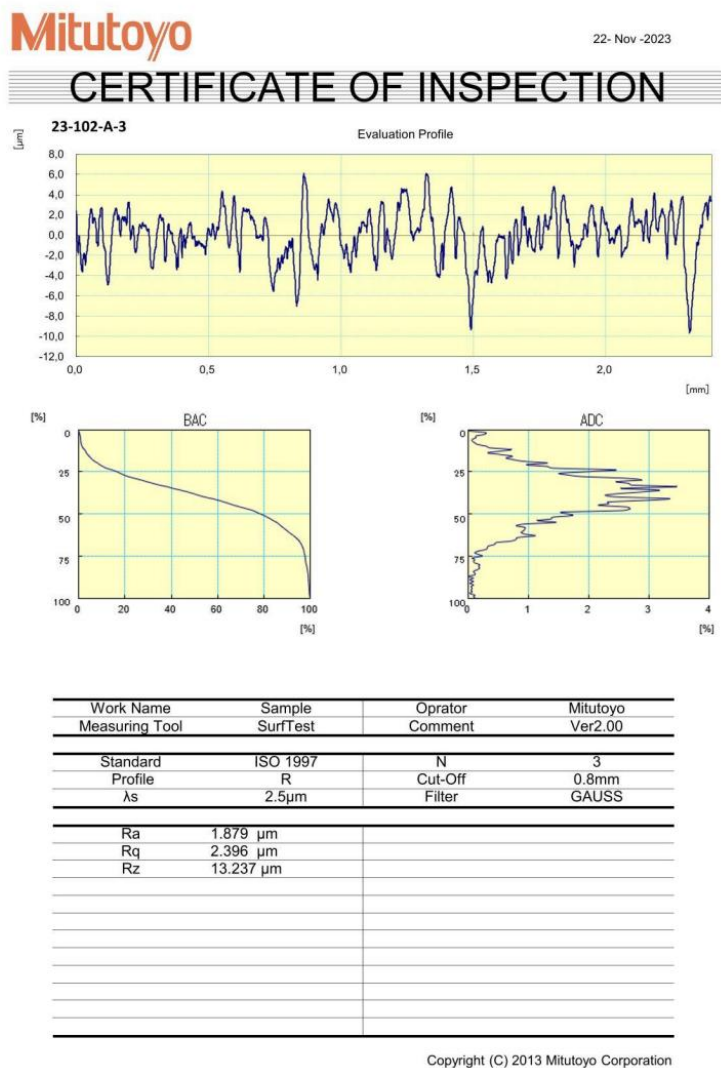
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
As	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.952 µm		
Rq	2.449 µm		
Rz	13.122 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB  
 RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec  
 Quito-Ecuador

**Figura AIII.3** Informe de probeta con granulación N°30

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 5 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-A		
	(Empty cell)		



Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N° 14 PB  
 RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec  
 Quito-Ecuador

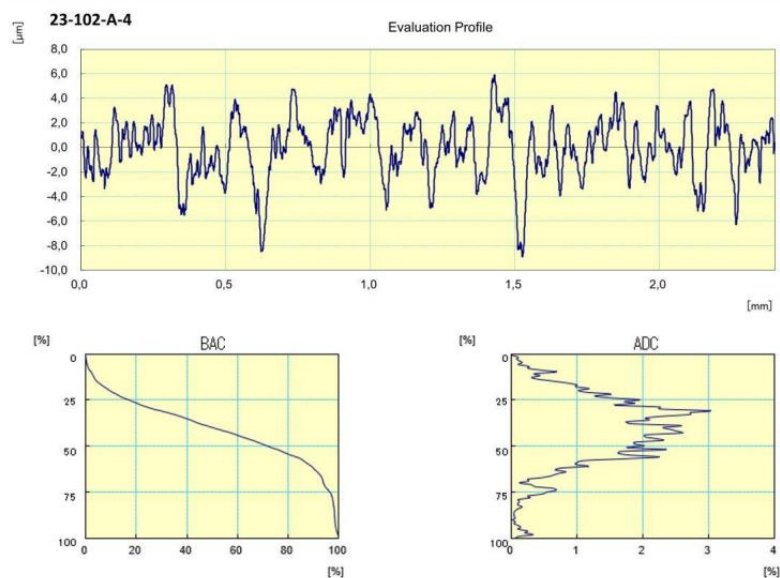
**Figura AIII.4** Informe de probeta con granulación N°30

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla</b> <b>(LMDF)</b>	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 6 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>RT-LMDF-0701</b>	
	<b>N° P0659-23-A</b>		



22- Nov -2023

## CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.983 µm		
Rq	2.511 µm		
Rz	13.107 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB  
 RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografía@epn.edu.ec  
 Quito-Ecuador

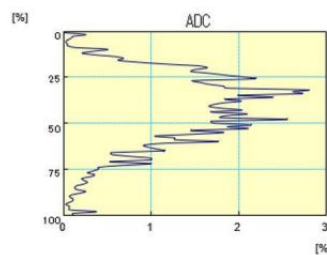
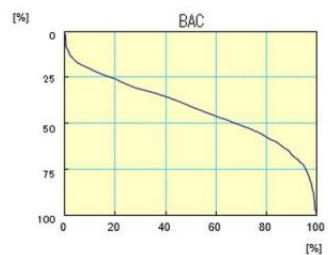
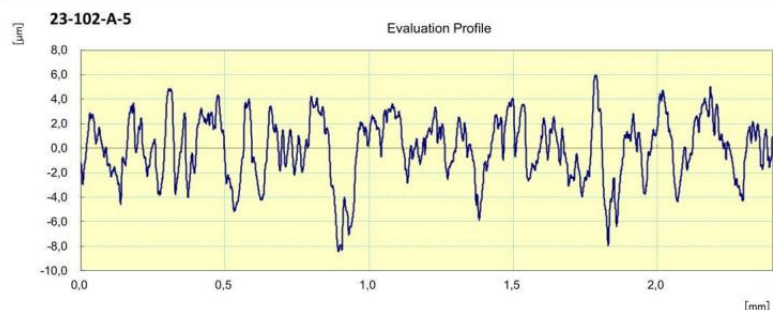
**Figura AIII.5** Informe de probeta con granulación N°30

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 7 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-A		
	(Empty space)		

Mitutoyo

22- Nov -2023

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	2.098 µm		
Rq	2.580 µm		
Rz	12.157 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

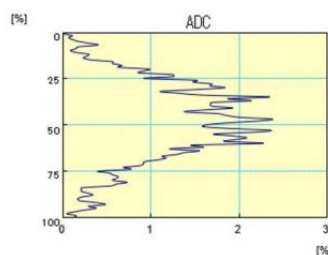
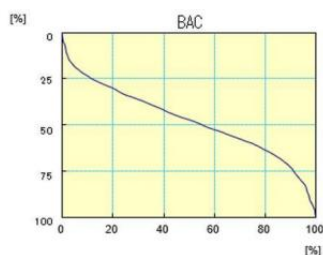
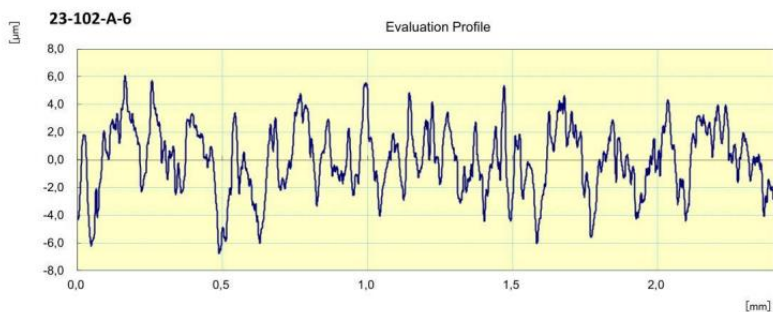
Figura AIII.6 Informe de probeta con granulación N°30

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
		Página: Pág. 8 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° P0659-23-A	<b>RT-LMDF-0701</b>	

**Mitutoyo**

22- Nov -2023

**CERTIFICATE OF INSPECTION**



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	1.981 µm		
Rq	2.424 µm		
Rz	11.525 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

**Figura AIII.7** Informe de probeta con granulación N°30

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
		Página: Pág. 9 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° P0659-23-A	<b>RT-LMDF-0701</b>	

**DECLARATORIA:**

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

**Atentamente:**

Informe

Elaborado por:


 ANDRÉS MAURICIO  
 LÓPEZ ANCHALI

Ing. Andrés López

**Asistente del Laboratorio de Metalografía,  
 Desgaste y Falla.**

Revisado y Aprobado por:


 PATRICIA MARIANA  
 PROAÑO SANCHEZ

Ing. Patricia Proaño

**Responsable del Laboratorio de  
 Metalografía, Desgaste y Falla.**



Nota: Se anexa 1 fotografía

**ANEXO FOTOGRAFÍCO**

**Fotografía N° 1.** Elemento 23-102-A, entregado en el laboratorio de metalografía, desgaste y falla para análisis.

## ANEXO IV

### ENSAYOS DE RUGOSIDAD N°120

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 2 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-C		

#### 3. PARÁMETRO DEL ENSAYO:

El ensayo se realizó con el equipo digital MITUTOYO, modelo SJ-210, bajo las especificaciones de la norma ASME B46.1 (2009) y en base a los requerimientos del cliente. En donde:

- La muestra fue entregada con la superficie pulida.
- Posteriormente la muestra se somete a un proceso de limpieza con agua, jabón y alcohol, para luego secarlas.
- Velocidad de avance 0.25 mm/s, longitud de onda ( $\lambda_c$ ) 0.8.
- El área de prueba fue seleccionada por el técnico del laboratorio, de acuerdo con las especificaciones del cliente, tal como se observa en la Figura N°1.
- Los resultados obtenidos en el ensayo se tomaron de acuerdo con requerimiento del cliente, se realizó 6 mediciones por cada muestra.
- Los resultados de ensayo se despliegan en los reportes emitidos por el equipo.

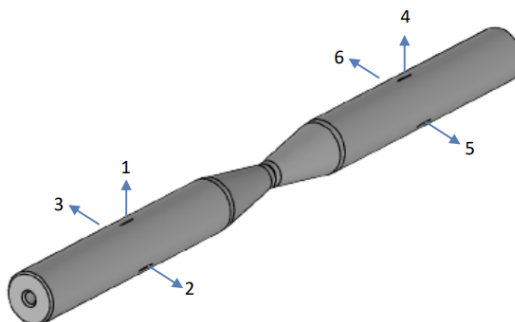


Figura N° 1. Bosquejo del lugar de medición de rugosidad

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 3 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-C		

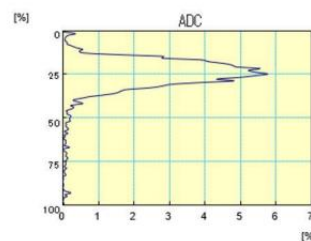
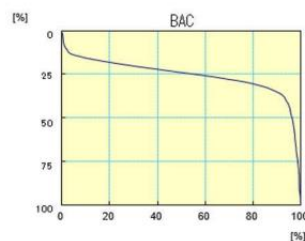
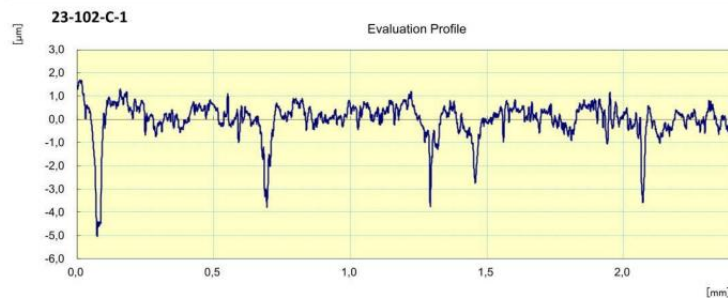
4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RUGOSIDAD

23-102-C



22- Nov -2023

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.490 µm		
Rq	0.746 µm		
Rz	5.459 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB  
 RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec  
 Quito-Ecuador

Figura AIV.2 Informe de probeta con granulación N°120

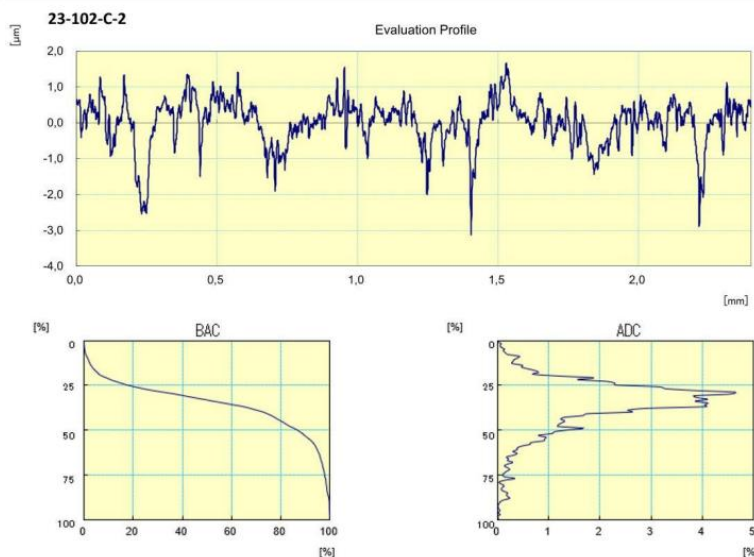


	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 4 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-C		

Mitutoyo

22- Nov -2023

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.482 µm		
Rq	0.650 µm		
Rz	4.246 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

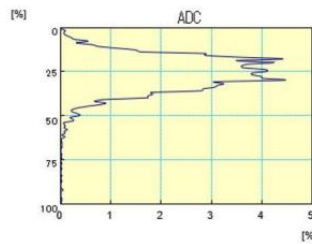
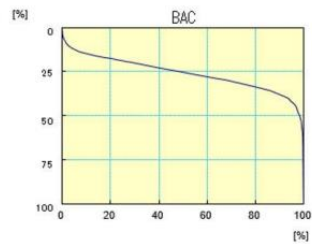
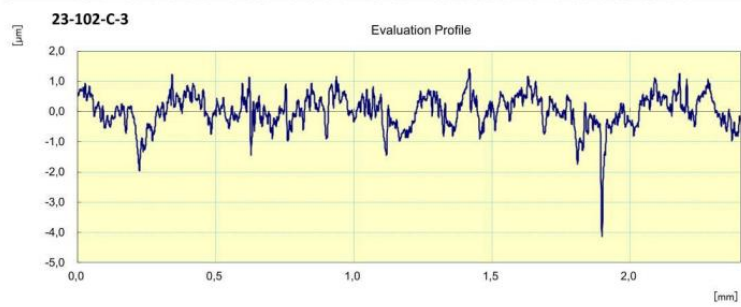
Figura AIV.3 Informe de probeta con granulación N°120

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 5 de 9	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701	
	N° P0659-23-C		
	(Empty space)		

Mitutoyo

22- Nov -2023

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.423 µm		
Rq	0.545 µm		
Rz	3.810 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

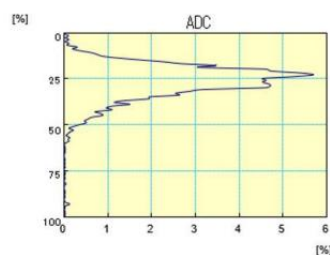
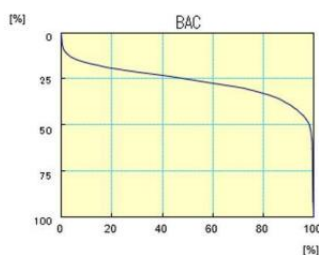
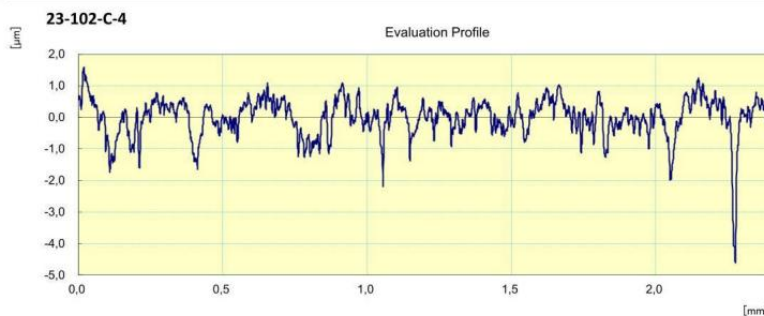
Figura AIV.4 Informe de probeta con granulación N°120

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
		Página: Pág. 6 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° P0659-23-C	<b>RT-LMDF-0701</b>	

**Mitutoyo**

22- Nov -2023

**CERTIFICATE OF INSPECTION**



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.442 µm		
Rq	0.602 µm		
Rz	4.151 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB  
 RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec  
 Quito-Ecuador

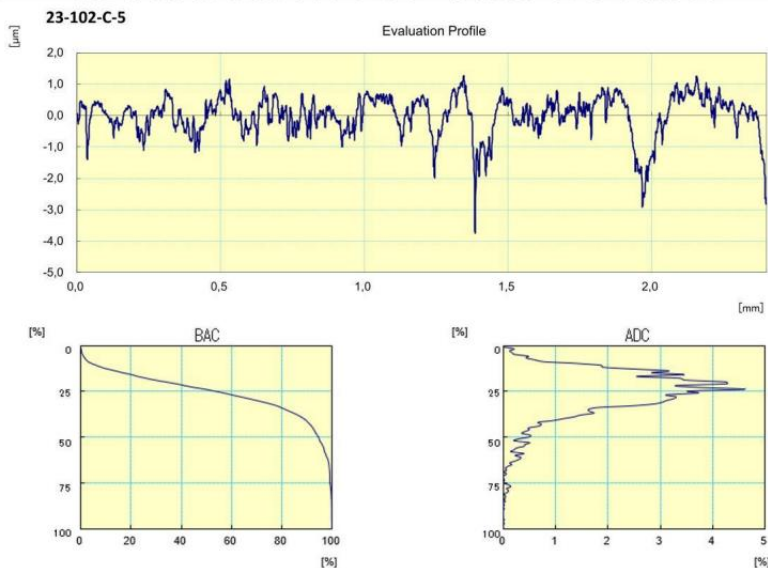
**Figura AIV.5** Informe de probeta con granulación N°120

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
		Página: Pág. 7 de 9	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° P0659-23-C	<b>RT-LMDF-0701</b>	

**Mitutoyo**

22- Nov -2023

## CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.470 µm		
Rq	0.618 µm		
Rz	3.917 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

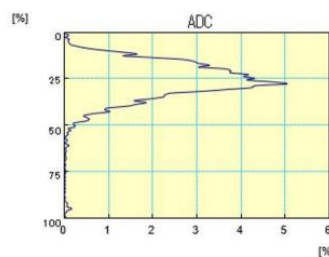
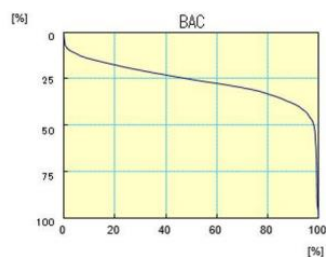
**Figura AIV.6** Informe de probeta con granulación N°120

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 09/09/2019 Página: Pág. 8 de 9	 LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DESGASTE Y FALLA DEPARTAMENTO DE MATERIALES ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>RT-LMDF-0701</b>	
	N° P0659-23-C		



22- Nov -2023

## CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5μm	Filter	GAUSS
Ra	0.463 μm		
Rq	0.633 μm		
Rz	4.271 μm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation

**Figura AIV.7** Informe de probeta con granulación N°120

	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 09/09/2019	
	Página: Pág. 9 de 9		
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° P0659-23-C		

**DECLARATORIA:**

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

**Atentamente:**

Informe

Elaborado por:



Ing. Andrés López

**Asistente del Laboratorio de Metalografía,  
 Desgaste y Falla.**

Revisado y Aprobado por:



Ing. Patricia Proaño

**Responsable del Laboratorio de  
 Metalografía, Desgaste y Falla.**

Nota: Se anexa 1 fotografía

**ANEXO FOTOGRAFÍCO**

**Fotografía N° 1.** Elemento 23-102-C, entregado en el laboratorio de metalografía, desgaste y falla para análisis.

**ANEXO V.1 MANUAL DE USUARIO**

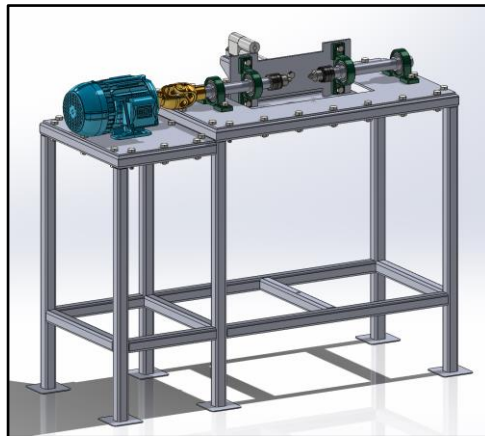


# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

MANUAL DE USUARIO

TEMA: “MÁQUINA DE ENSAYOS A FATIGA ROTATIVA.”



AUTORES: GUALAVISÍ GUZMÁN ANGEL ALEXANDER  
HARO GONZÁLEZ CRISTIAN JEAMPIER

DIRECTOR: ING. FERNANDO RENATO RAMÍREZ PAREDES, PHD.

Ibarra, 2024









## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura AV.1</b> Componentes .....	<b>130</b>
<b>Figura AV.2</b> Gabinete .....	<b>131</b>
<b>Figura AV.3</b> Gabinete interno.....	<b>132</b>
<b>Figura AV.4</b> HMI.....	<b>132</b>
<b>Figura AV. 5</b> Encendido de Breaker .....	<b>134</b>
<b>Figura AV.6</b> Posición de probeta lado izquierdo.....	<b>134</b>
<b>Figura AV.7</b> Posición de probeta lado derecho .....	<b>135</b>
<b>Figura AV.8</b> Centro de probeta.....	<b>135</b>
<b>Figura AV.9</b> Posición final .....	<b>136</b>
<b>Figura AV.10</b> Imagen de bienvenida .....	<b>136</b>
<b>Figura AV.11</b> Caracterización del ensayo .....	<b>137</b>
<b>Figura AV.12</b> Interfaz de ensayo .....	<b>137</b>
<b>Figura AV.13</b> Detener el ensayo.....	<b>138</b>
<b>Figura AV.14</b> Imagen del proceso. ....	<b>138</b>
<b>Figura AV.15</b> Resumen del ensayo. ....	<b>139</b>
<b>Figura AV.16</b> Fin del ensayo. ....	<b>139</b>
<b>Figura AV.17</b> Plano de la probeta.....	<b>141</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla AV.1</b> Elementos de la máquina.....	<b>130</b>
<b>Tabla AV.2</b> Elementos del tablero de control.....	<b>133</b>

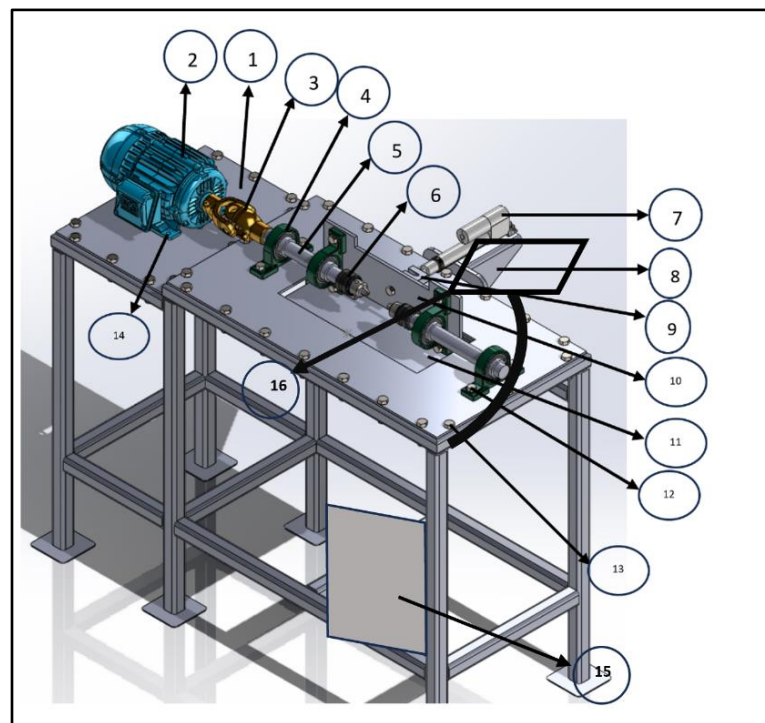
## 1. Instrucciones de Seguridad

- Antes de poner en funcionamiento la máquina, es importante verificar el estado de todos sus componentes mecánicos. 
- No levante la protección de los terminales de alimentación mientras la máquina esté energizada, ya que hacerlo podría ocasionar lesiones físicas debido a descargas eléctricas. 
- Antes de cualquier revisión, asegúrese de desconectar la máquina para desenergizarla adecuadamente.   
RIESGO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS
- Se recomienda el uso de guantes de seguridad al revisar cualquier componente mecánico y/o eléctrico. 
- No se debe intentar tocar ningún componente mecánico en movimiento, ya que esto podría causar graves lesiones en las manos. 
- Ajuste los parámetros de ensayo en la máquina según la planificación realizada previamente siguiendo el procedimiento de **Operación de la máquina**. De lo contrario, podría haber un funcionamiento incorrecto y ocasionar daños. 

## 2. Descripción de la máquina

La máquina de ensayos a fatiga rotativa por flexión es un dispositivo que permite inducir una falla por fatiga en probetas bajo la norma ASTM - E466. Este proceso se lleva a cabo mediante un mecanismo compuesto por un actuador lineal y una celda de carga que se conecta a una placa acoplada mediante chumaceras, a un eje encargado de recibir la potencia del motor. Así, los esfuerzos del ensayo se concentran en la probeta. La máquina está equipada con un sistema de control que permite regular parámetros como los rpm y la carga aplicada. El monitoreo del ensayo se realiza a través de dos sensores: un sensor inductivo para conocer la cantidad de ciclos y una celda de carga para medir la fuerza aplicada y determinar el esfuerzo en la probeta. Además, la máquina cuenta con un tablero de control que facilita el procedimiento y el monitoreo de las señales mientras la máquina está en funcionamiento.

### 3. Componentes



**Figura AV.1** Componentes

La **Figura AV.1** muestra todos los componentes de la máquina de ensayos a fatiga rotativa, incluyendo los elementos electrónicos añadidos para su automatización.

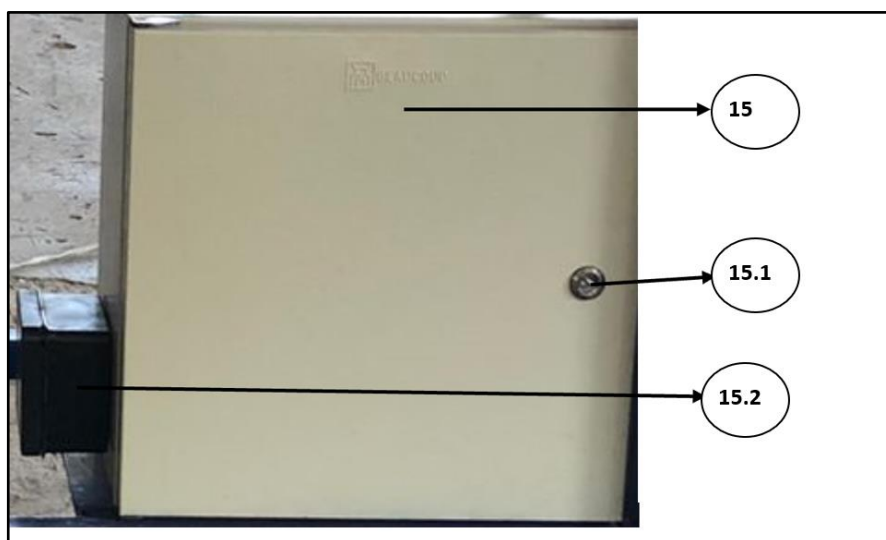
**Tabla AV.1** Elementos de la máquina

N° de elemento	N° de pieza	Cantidad
1	Estructura	1
2	Motor	1
3	Cardan	1
4	Chumaceras	4
5	Eje acero AISI 1018	2
6	Mandriles ER20A	2
7	Actuador lineal	1
8	Base de actuador	2
9	Celda de carga	1
10	Base móvil acero A36	1
11	Soporte de base móvil acero negro	1
12	Tornillo 7/8 in	8
13	Tornillo 3/4 in	26
14	Tornillo 3/8 in	6
15	Gabinete de control	1
16	HMI	1

La **Tabla AV.1** detalla cada uno de los elementos de la máquina, así como la cantidad correspondiente utilizados para su fabricación.

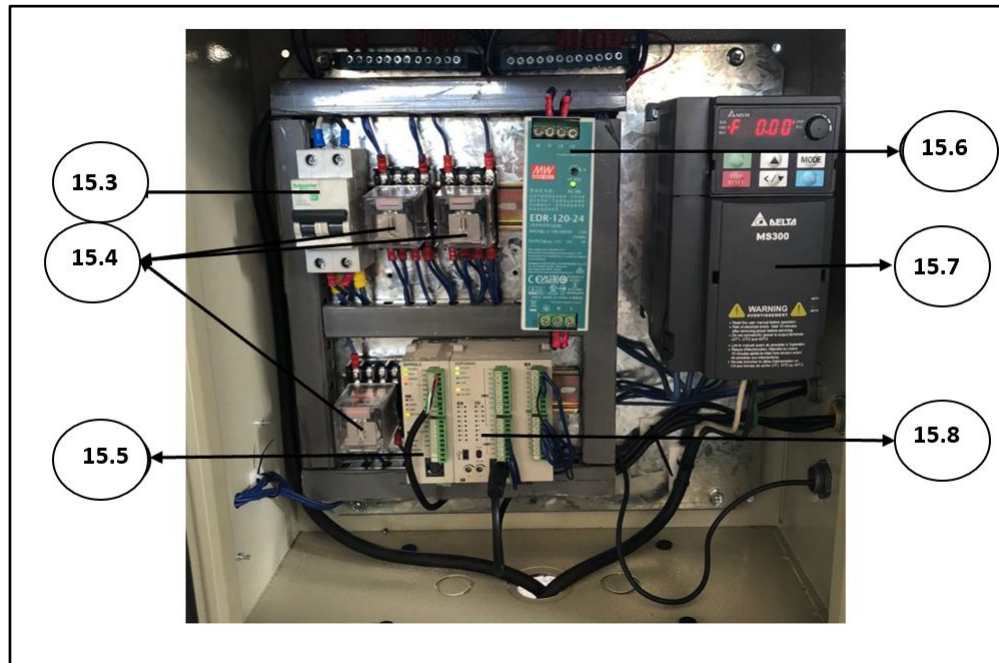
### 3.1. Tablero de control y HMI

A continuación, se presenta toda la electrónica agregada a la máquina para su respectiva automatización.



**Figura AV.2** Gabinete

En la **Figura AV.2** se presenta el gabinete desde el exterior, donde cada una de sus partes está claramente numerada. Estas partes se describen en la tabla a continuación.



**Figura AV.3** Gabinete interno

En la **Figura AV.3** se presenta el gabinete desde la parte interna, donde cada una de sus partes está claramente numerada. Estas partes se describen en la tabla a continuación.



**Figura AV.4** HMI

En la **Figura AV.4** se presenta el gabinete desde la parte interna, donde cada una de sus partes ésta claramente numerada. Estas partes se describen en la tabla a continuación.

**Tabla AV.2** Elementos del tablero de control

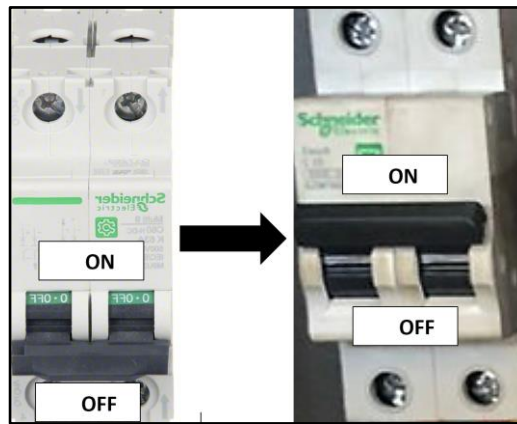
<b>N<sup>a</sup> de elemento</b>	<b>N<sup>a</sup> de pieza</b>	<b>Componente</b>
<b>15</b>	Gabinete	1
<b>15.1</b>	Cerrojo	1
<b>15.2</b>	Regulador de actuador	1
<b>15.3</b>	Breaker	1
<b>15.4</b>	Relees	3
<b>15.5</b>	Módulo celda de carga DVP SX2	1
<b>15.6</b>	Fuente	1
<b>15.7</b>	Variador de frecuencia DELTA MS 300	1
<b>15.8</b>	PLC DELTA DVP20SX211T	1
<b>16</b>	HMI DELTA DOP-103BQ	1
<b>16.1</b>	Gabinete HMI	1

En la **Tabla AV.2** se presenta la correspondencia entre las piezas y la numeración de los elementos de control tanto del panel externo como interno.

## OPERACIÓN DE LA MÁQUINA

1. Antes de poner en marcha la máquina, es necesario verificar que todos los componentes mecánicos estén en condiciones óptimas.

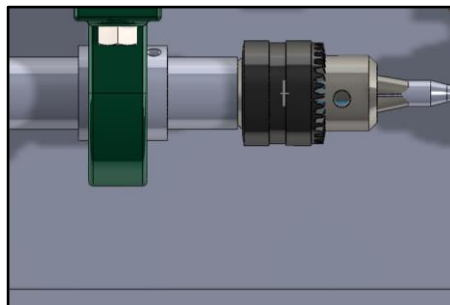
2. Conectar la entrada de energía, ubicada en el gabinete, a una red eléctrica de 220V Trifásica. Además, es importante alimentar el tablero activando el breaker, asegurándose de colocarlo en la posición hacia arriba. Como indica la **Figura AV.5**.



**Figura AV. 5** Encendido de Breaker

3. Ubicar la probeta en el lugar correspondiente y ajustar los mandriles de cada lado con las llaves especiales.

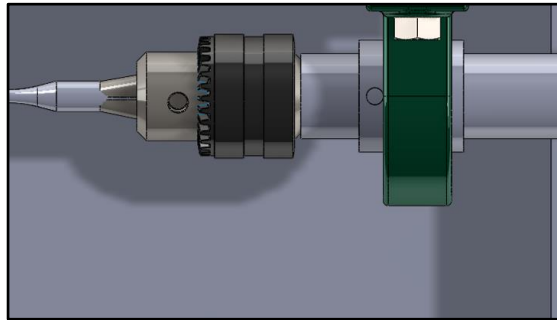
3.1. Al momento de posicionar la probeta es necesario ubicar primero por el lado izquierdo hasta el final/tope del mandril. Como se indica en la **Figura AV.6**.



**Figura AV.6** Posición de probeta lado izquierdo

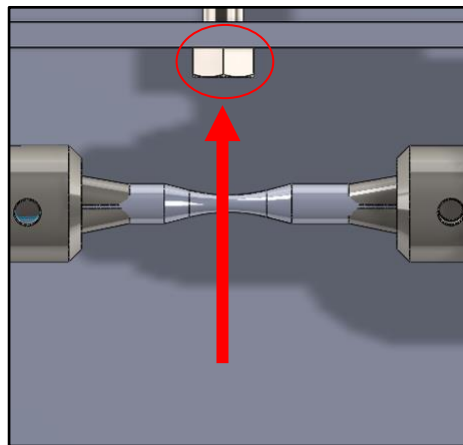


3.2. Introducir la probeta en el mandril derecho del hasta el fondo. Como se indica en la **Figura AV.7.**



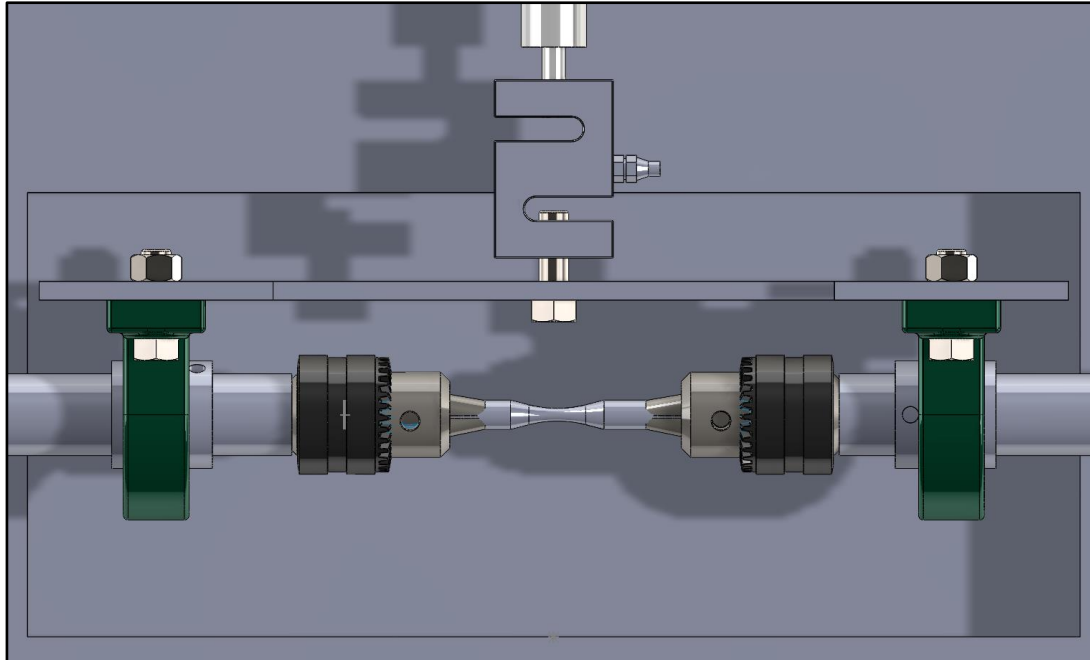
**Figura AV.7** Posición de probeta lado derecho

3.3 Alinear la probeta con el punto central designado como referencia en la máquina donde se aplicará la carga. Como se indica en la **Figura AV.8.**



**Figura AV.8** Centro de probeta

3.4 Ajustar los mandriles por ambos lados de manera fuerte y firme para evitar problemas de desajuste de la probeta y falle el ensayo. Hay que considerar que, en operación, si el apriete no es el adecuado los mandriles podrían desajustarse. Como indica la **Figura AV. 9.**



**Figura AV.9** Posición final

4. Antes de realizar el ensayo, es recomendable esperar un tiempo prudente (10 segundos) hasta que el sistema del PLC y del HMI (pantalla) se haya cargado por completo.
5. Preparar los parámetros en el HMI a los que se van a realizar los ensayos, saltar la primera imagen de bienvenida. Pulsando en la flecha que se encuentra en la parte inferior derecha. Como indica la **Figura AV.10**.



**Figura AV.10** Imagen de bienvenida

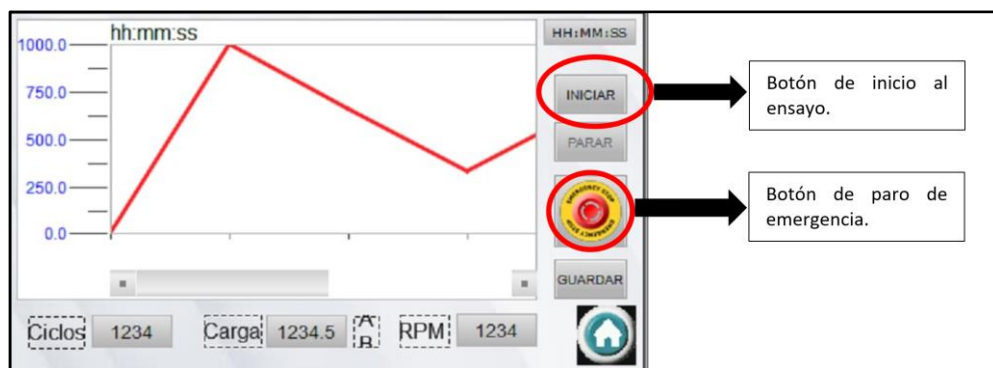
6. Ajustar el esfuerzo y la velocidad en la probeta, para ello se debe pulsar el botón de (+) en la variable “Carga Real Aplicada” para empezar aplicar un valor de carga hacia la probeta. Aplicar los rpm al motor en la variable “Velocidad” con un valor mínimo de 0 rpm y un valor máximo de 1745 rpm, cuenta con un teclado numérico y una barra de selección que nos permite elegir la velocidad que se requiere. Como se indica en la **Figura AV.11**.



**Figura AV.11** Caracterización del ensayo

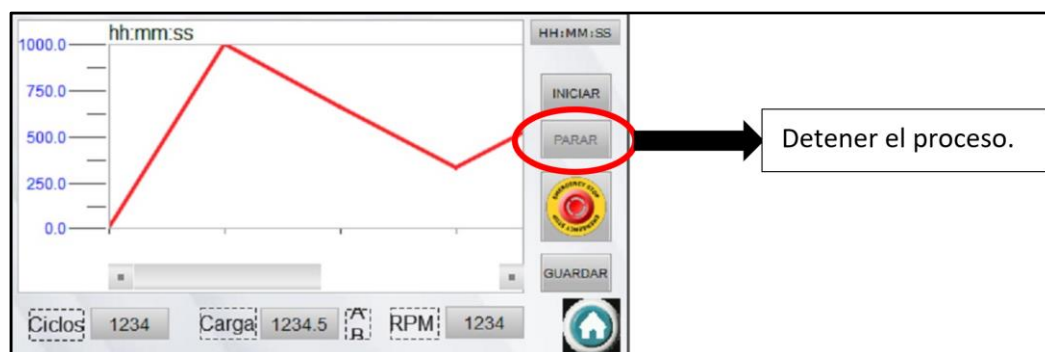
Para comenzar el ensayo de manera segura, es necesario activar el botón de paro de emergencia. De lo contrario, el ensayo no podrá comenzar hasta que se desactive la parada de emergencia.

7. Pulsar el botón “Iniciar” para empezar el ensayo. En esta interfaz se muestra en tiempo real los datos como número de ciclos, valor de carga y las rpm en cada segundo de igual manera una gráfica que monitoriza todo el ensayo mientras dura. Como indica la **Figura AV.12**.



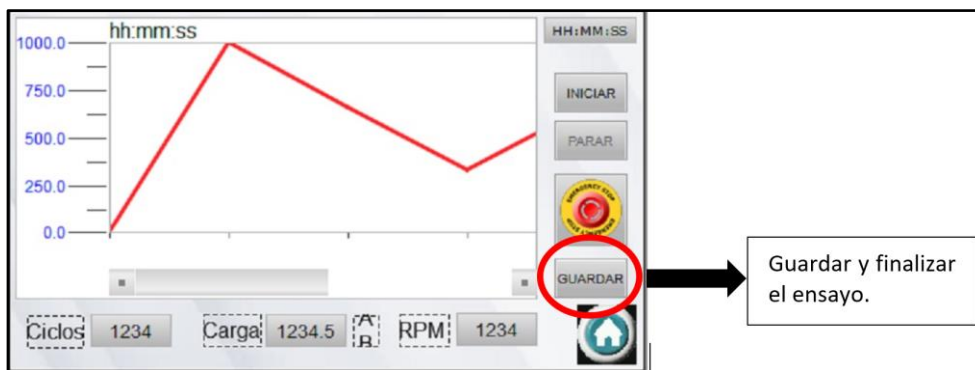
**Figura AV.12** Interfaz de ensayo

8. Si es necesario finalizar el ensayo de manera anticipada o debido a un imprevisto, se puede pulsar el botón de "PARAR" para interrumpir el proceso, o activar la parada de emergencia. Como se indica la **Figura AV.13**.



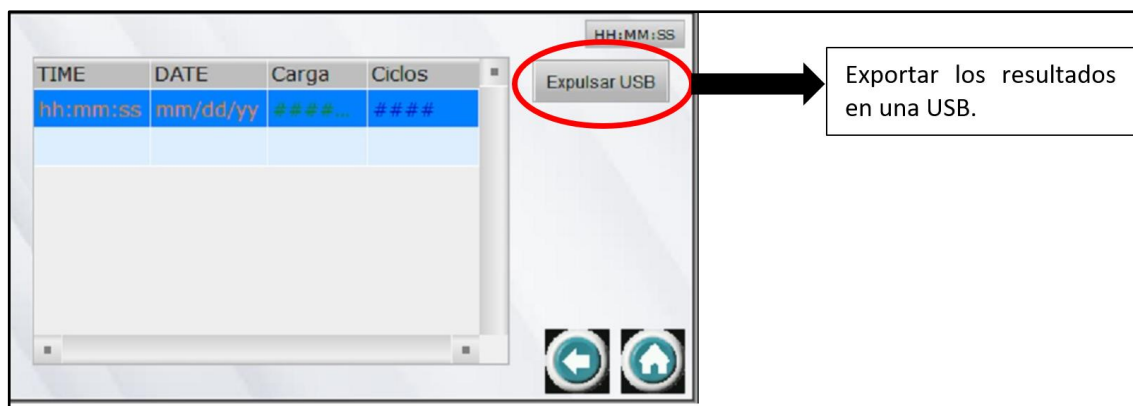
**Figura AV.13** Detener el ensayo

9. Al finalizar el ensayo el motor se detendrá de manera automática después de 3 segundos, se debe presionar el botón "GUARDAR" para obtener los valores que se almacenan en el HMI. De igual forma se debe reiniciar el cronometro de duración del ensayo. Como se indica la **Figura AV.14**.



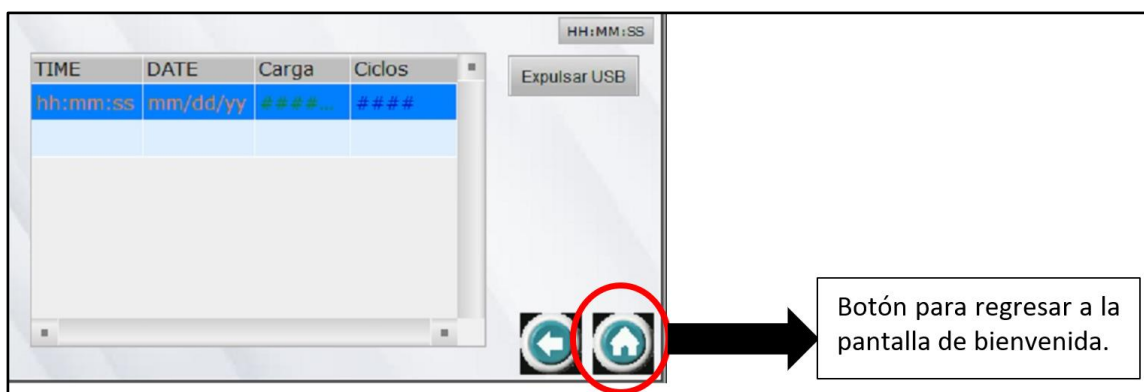
**Figura AV.14** Imagen del proceso.

10. Después se mostrará una tabla con el resumen de datos contados hasta el fallo de la ruptura con la facilidad de ser exportados en una USB en una tabla de Excel. Como se indica en la **Figura AV.15**.



**Figura AV.15** Resumen del ensayo.

11. Si necesita realizar otro ensayo, simplemente presionar en el botón que muestra la imagen de "HOME" para volver a la pantalla de bienvenida. Como se indica en la **Figura AV.16**.



**Figura AV.16** Fin del ensayo.

12. Si es necesario realizar otro ensayo, se debe retirar la probeta rota y repetir los pasos del 3 al 11.

## Recomendaciones

- Mantenimiento y cuidado en la transmisión de potencia (motor).
- Se sugiere considerar el tiempo de relubricación de las chumaceras, el cual debe realizarse en función del número de horas de trabajo de la máquina. Lo recomendable es hacerlo cada 1000 horas, según la documentación proporcionada por el fabricante.
- Desconecte la máquina cuando no esté en uso para prevenir sobre corrientes que puedan dañar el sistema.
- Coloque la máquina sobre una superficie plana para prevenir desconexiones eléctricas y electrónicas.
- No manipule la celda de carga para evitar posibles descalibraciones que puedan resultar en fallos en la medición del esfuerzo.
- Evite manipular el gabinete de control.

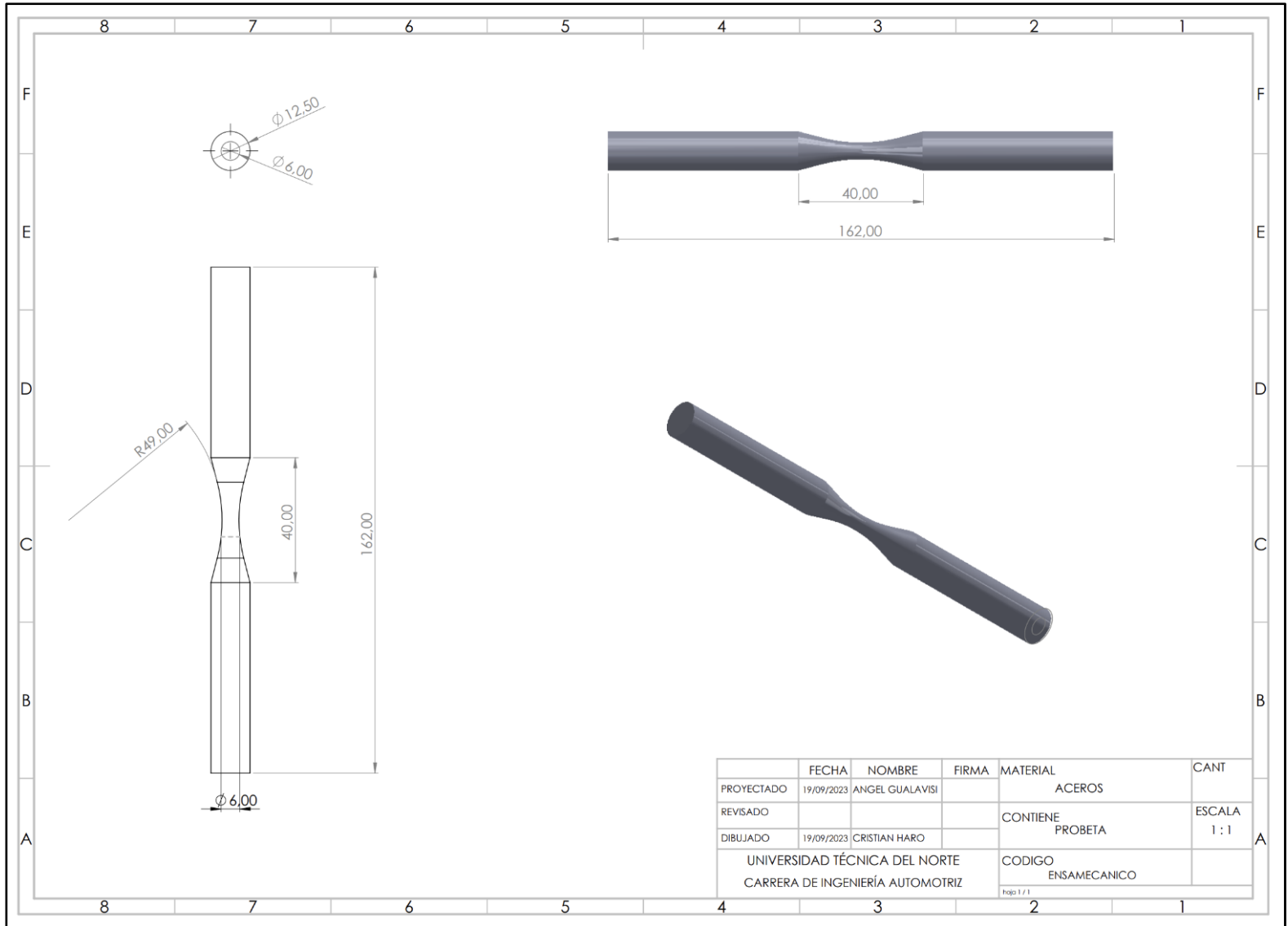


Figura AV.17 Plano de la probeta