



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

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

**AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE
FATIGA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE
MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS – ESPE**

BORJA BORJA CRISTIAN DARWIN

TAPIA CALLE ANDRÉS ALEJANDRO

DIRECTOR: PÉREZ ROSALES JOSÉ EMILIO

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRONICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto titulado, "AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE", realizado por el Señor **CRISTIAN DARWIN BORJA BORJA** y el Señor **ANDRÉS ALEJANDRO TAPIA CALLE**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CRISTIAN DARWIN BORJA BORJA** y el Señor **ANDRÉS ALEJANDRO TAPIA CALLE**, para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 13 de febrero del 2017

Ing. José Pérez.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRONICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **CRISTIAN DARWIN BORJA BORJA**, con cédula de identidad N° 1719252585, declaro que este trabajo de titulación "**AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 13 de febrero del 2017



CRISTIAN DARWIN BORJA BORJA
1719252585



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRONICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ANDRÉS ALEJANDRO TAPIA CALLE**, con cédula de identidad N° 1716925407, declaro que este trabajo de titulación “**AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 13 de febrero del 2017

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Andrés Tapia Calle', is positioned above the printed name.

ANDRÉS ALEJANDRO TAPIA CALLE

1716925407



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRONICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **CRISTIAN DARWIN BORJA BORJA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "**AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 13 de febrero del 2017


CRISTIAN DARWIN BORJA BORJA
1719252585



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECANICA
CARRERA DE INGENIERIA MECATRONICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **ANDRÉS ALEJANDRO TAPIA CALLE**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“AUTOMATIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 13 de febrero del 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Andrés Tapia Calle', is positioned above the printed name.

ANDRÉS ALEJANDRO TAPIA CALLE

1716925407

DEDICATORIA

A Dios por brindarme salud y vida.

A la Madre Dolorosa y al Colegio San Gabriel quienes me formaron con valores éticos y alta conciencia social.

A la República del Ecuador cuyo deseo de crecimiento y desarrollo me inspiraron a seguir esta carrera.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

Cristian Darwin Borja Borja

DEDICATORIA

A Dios sobre todas las cosas.

A mi madre ejemplo de lucha y perseverancia.

A mis hermanas por su invaluable ayuda.

A mi familia que siempre está a mi lado.

A mi esposa y mi hija motivos de mi existencia.

A mis amigos por su ayuda desinteresada.

Andrés Alejandro Tapia Calle

AGRADECIMIENTO

A la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE por el ejemplo de grandeza, humildad y trabajo; incentivo diario en nuestras vidas.

Al departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica y la carrera de Ingeniería Mecatrónica, por formarnos como personas y profesionales para enfrentar los problemas de la vida.

Nuestro especial agradecimiento a los Sres. Ing. José Pérez, Ing. Francisco Navas, Ing. Byron Cortéz e Ing. Borys Culqui por el incondicional apoyo que nos han brindado para la realización del presente proyecto.

A todos los compañeros, técnicos y personas que aportaron para que se lleve a cabo la automatización de la máquina de ensayos de fatiga.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

<u>CERTIFICACIÓN</u>	<u>I</u>
<u>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</u>	<u>II</u>
<u>AUTORIA DE RESPONSABILIDAD</u>	<u>III</u>
<u>AUTORIZACIÓN</u>	<u>IV</u>
<u>AUTORIZACIÓN</u>	<u>V</u>
<u>DEDICATORIA</u>	<u>VI</u>
<u>DEDICATORIA</u>	<u>VII</u>
<u>AGRADECIMIENTO</u>	<u>VIII</u>
<u>ÍNDICE DE CONTENIDOS</u>	<u>IX</u>
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	<u>XVI</u>
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	<u>XVII</u>
<u>RESUMEN</u>	<u>XXIII</u>
<u>ABSTRACT</u>	<u>XXIV</u>

	x
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.1.1. ANTECEDENTES	1
1.1.2. JUSTIFICACIÓN	6
1.2. OBJETIVOS	7
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	7
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.3. ALCANCE	8
1.3.1. COMPONENTES MECÁNICOS	8
1.3.2. COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	8
1.3.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL	9
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	11
2.1. MÁQUINAS DE ENSAYOS DE FATIGA CONVENCIONALES	14
2.1.1. MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA TIPO VIGA EN VOLADIZO	14
2.1.2. MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA TIPO R. R. MOORE	17
2.2. MÁQUINAS DE ENSAYOS DE FATIGA AUTOMATIZADAS	20
2.2.1. MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA – FATIMAT (FATIGUE IN MATERIALS)	20
2.3. MÁQUINAS DE ENSAYOS DE FATIGA DE RESORTE	22
CAPÍTULO 3 DISEÑO MECATRÓNICO	24
3.1. ESTADO ACTUAL DE LA MÁQUINA	25
3.1.1. FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	27
3.1.2. PROPUESTAS PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO	33
3.1.2.1. ALTERNATIVA NÚMERO 1	33
3.1.2.2. ALTERNATIVA NÚMERO 2	34
3.1.2.3. ALTERNATIVA NÚMERO 3	35
3.1.2.4. MATRIZ DE SELECCIÓN	37
3.2. DISEÑO DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS	41
3.2.1. CAJA DE CONTROL	41

3.2.2. SOPORTE PARA CAJA DE CONTROL	51
3.2.3. SOPORTE PARA MOTOR	60
3.2.4. ACONDICIONAMIENTO MECÁNICO PARA SENSOR DE DISTANCIA	62
3.2.5. ACONDICIONAMIENTO MECÁNICO PARA CELDA DE CARGA	63
3.2.6. ACOPLAMIENTO ENCODER-MOTOR	64
3.3. DISEÑO DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	67
3.3.1. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN	68
3.3.1.1. CÁLCULO DE LA POTENCIA DEL MOTOR	73
3.3.1.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	77
3.3.2. CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN	79
3.3.2.1. INSTALACIÓN TRIFÁSICA	80
3.3.2.2. FUENTE DE PODER	80
3.3.3. PULSADOR DE EMERGENCIA	83
3.3.4. INDICADORES ELÉCTRICOS	85
3.3.5. BORNERAS	86
3.3.6. CABLEADO	86
3.3.6.1. CABLEADO ELÉCTRICO	86
3.3.6.2. CABLEADO DE COMUNICACIÓN	91
3.3.7. PROTECCIONES ELÉCTRICAS	93
3.3.8. SENSORES Y ACONDICIONAMIENTOS	95
3.3.8.1. SENSOR DE DISTANCIA	95
3.3.8.1.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	96
3.3.8.2. CELDA DE CARGA	97
3.3.8.2.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	99
3.3.8.3. ACONDICIONAMIENTO CELDA DE CARGA	102
3.3.8.3.1. BLOQUE 1	103
3.3.8.3.2. BLOQUE 2	103
3.3.8.4. ENCODER	106
3.3.8.4.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	108
3.4. DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL	109
3.4.1. RED INDUSTRIAL	109
3.4.1.1. PANTALLA TÁCTIL HMI	110

3.4.1.1.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	111
3.4.1.2. VARIADOR DE FRECUENCIA (VDF)	112
3.4.1.2.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	119
3.4.1.3. PLC	120
3.4.1.3.1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	122
3.4.2. SELECCIÓN DE SISTEMA DE CONTROL	126
3.4.2.1. CONTROL DE ARRANQUE Y VELOCIDAD DEL MOTOR	126
3.4.2.1.1. PLANTA: MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN	127
3.4.2.1.2. CONTROLADOR: HMI-VDF	127
3.4.2.1.3. REALIMENTACIÓN	128
3.4.2.2. CONTROL DE DETENCIÓN DE LA MÁQUINA AL FINALIZAR EL ENSAYO	128
3.4.2.2.1. PLANTA: MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN	129
3.4.2.2.2. CONTROLADOR: HMI-VDF-PLC	129
3.4.2.2.3. REALIMENTACIÓN Y SENSORES	130
3.5. DISEÑO DE SOFTWARE	131
3.5.1. PROGRAMACIÓN PLC	131
3.5.2. PROGRAMACIÓN PANTALLA TÁCTIL HMI	132
3.5.2.1. ARQUITECTURA	134
3.5.2.2. INDICADORES	134
3.5.2.2.1. DISTRIBUCIÓN DE PANTALLAS	134
3.5.2.3. NAVEGACIÓN	135
3.5.2.4. USO DEL COLOR	135
3.5.2.5. USO DE FUENTES E INFORMACIÓN TEXTUAL	135
3.5.2.6. INFORMACIÓN Y VALORES DEL PROCESO	136
3.5.2.7. GRÁFICOS DE TENDENCIAS Y TABLAS	136
3.5.2.8. COMANDOS Y ENTRADAS DE DATOS	136
3.5.2.9. ALARMAS	136
3.5.3. DOPSOFT	136
3.5.3.1. CREAR UN PROYECTO	137
3.5.3.2. SELECCIÓN DEL MODELO DE PANTALLA	137
3.5.3.3. OPCIONES DE COMUNICACIÓN	138
3.5.3.4. ENTORNO DE TRABAJO	138

3.5.3.5. ELEMENTOS DENTRO DE DOPSOFT	140
3.5.4. DISEÑO EN DOPSOFT	141
3.5.4.1. PANTALLA HOME	141
3.5.4.2. PANTALLA DEL PROCESO	141
3.5.4.3. PANTALLAS DE SUB PROCESOS	142
3.5.4.3.1. ALINEAMIENTO DE MANDRILES	142
3.5.4.3.2. SETEO DE FRECUENCIA	142
3.5.4.3.3. DIÁMETRO DE LA PROBETA	142
3.5.4.3.4. GRÁFICO ESFUERZO VS RPM	143
3.5.4.4. PANTALLA DE ALERTAS	143
3.5.4.4.1. ALARMAS	143
3.5.4.4.2. FINALIZACIÓN DEL ENSAYO	144
<u>CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN</u>	145
4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO, EQUIPO O MÁQUINA	145
4.1.1. CAJA DE CONTROL	145
4.1.2. SOPORTE PARA MOTOR	146
4.1.3. ACOPLÉ (MATRIMONIO)	147
4.1.3.1. ACOPLÉ FLEXIBLE DE TIPO CRUCETA	147
4.1.4. ACONDICIONAMIENTO MECÁNICO PARA SENSOR DE DISTANCIA	148
4.1.5. ACONDICIONAMIENTO MECÁNICO PARA CELDA DE CARGA	149
4.1.6. ACOPLAMIENTO ENCODER-MOTOR	150
4.1.7. PROTECCIÓN PARA ENCODER	152
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	152
4.2.1. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN	152
4.2.2. CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN	155
4.2.2.1. INSTALACIÓN TRIFÁSICA	155
4.2.2.2. FUENTE DE PODER	156
4.2.3. PULSADOR DE EMERGENCIA	157
4.2.4. INDICADORES ELÉCTRICOS	159
4.2.5. BORNERAS	159
4.2.6. CABLEADO	160

4.2.6.1. CABLEADO ELÉCTRICO	160
4.2.6.2. CABLEADO DE COMUNICACIÓN	162
4.2.7. PROTECCIONES ELÉCTRICAS	163
4.2.8. sensores y acondicionamientos	164
4.2.8.1. SENSOR DE DISTANCIA	164
4.2.8.2. CELDA DE CARGA	165
4.2.8.3. ACONDICIONAMIENTO CELDA DE CARGA	165
4.2.8.4. ENCODER	167
4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	168
4.3.1. PANTALLA TÁCTIL HMI	168
4.3.2. VARIADOR DE FRECUENCIA (VDF)	169
4.3.3. PLC	169
4.4. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	170
4.4.1 PANTALLA TÁCTIL HMI	170
4.4.2 VARIADOR DE FRECUENCIA	182
4.4.3 PLC	182
4.4.4 COMUNICACIÓN HMI-VDF	188
4.4.5 COMUNICACIÓN HMI-PLC	189
4.4.6 COMUNICACIÓN VDF-PLC	189
4.5. PRUEBAS Y RESULTADOS	189
4.5.1. NORMA ASTM E606	189
4.5.1.1. PARÁMETROS PARA REALIZACIÓN DEL ENSAYO	190
4.5.2. NORMA ASTM E466	190
4.5.2.1. PARÁMETROS PARA REALIZACIÓN DEL ENSAYO	190
4.5.3. NORMAS APLICABLES A ENSAYOS DE FATIGA	191
4.5.3.1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)	191
4.5.3.2. UNA NORMA ESPAÑOLA (UNE)	191
4.5.4. VELOCIDAD DEL MOTOR	191
4.5.5. FUNCIONAMIENTO SENSOR DE DISTANCIA	191
4.5.6. FUNCIONAMIENTO ACONDICIONAMIENTO CELDA DE CARGA	192
4.5.7. FUNCIONAMIENTO ENCODER	192
4.5.8. FUNCIONAMIENTO CONTACTO PARO DE EMERGENCIA	192

<u>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>194</u>
--	------------

<u>ANEXOS</u>	<u>202</u>
---------------	------------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de selección	37
Tabla 2. Dimensiones gabinetes comerciales.....	42
Tabla 3. Especificaciones técnicas HMI - Dimensiones.....	42
Tabla 4. Datos técnicos variador de frecuencia – Dimensiones	44
Tabla 5. Especificaciones técnicas PLC - Dimensiones	44
Tabla 6. Especificaciones técnicas fuente de Poder - Dimensiones.....	45
Tabla 7. Especificaciones técnicas disyuntores - Dimensiones	46
Tabla 8. Detalle del peso de la caja de control	53
Tabla 9. Resumen de resultados – arranque directo	62
Tabla 10. Resumen de resultados – arranque con VDF	62
Tabla 11. Catálogo de motores disponibles en el mercado	79
Tabla 12. Especificaciones técnicas fuente de poder	83
Tabla 13. Especificaciones técnicas del contacto del pulsador de emergencia.....	85
Tabla 14. Dimensionamiento de cables eléctricos	88
Tabla 15. Calibre de cable a utilizarse	89
Tabla 16. Especificaciones técnicas de los disyuntores	95
Tabla 17. Especificaciones técnicas sensor de distancia	97
Tabla 18. Especificaciones técnicas HMI.....	112
Tabla 19. Parámetros de un motor controlado por VDF	118
Tabla 20. Especificaciones técnicas variador de frecuencia.....	120
Tabla 21. Especificaciones técnicas PLC	124
Tabla 22. Iconos de navegación	135
Tabla 23. Especificaciones técnicas cables eléctricos para interior.....	160
Tabla 24. Especificaciones técnicas cables eléctricos para exterior.....	161
Tabla 25. Parámetros VDF programados	182

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Máquina Conjunto.....	11
Figura 2. Máquina de ensayos de fatiga	12
Figura 3. Máquina de ensayos de materiales	13
Figura 4. Equipo de flexión de vigas	14
Figura 5. Máquina de ensayos de fatiga tipo viga en voladizo.....	14
Figura 6. Chumacera fija.....	15
Figura 7. Eje de rotación.....	15
Figura 8. Sistema de pesas	16
Figura 9. Contador.....	16
Figura 10. Chumacera móvil.....	17
Figura 11. Máquina de ensayos de fatiga - ESPE	18
Figura 12. Bosquejo de una Máquina de Moore	19
Figura 13. Máquina de ensayos de fatiga FATIMAT	20
Figura 14. Flexión en la probeta	21
Figura 15. Funcionamiento de la máquina de	22
Figura 16. Esfuerzos de tracción y compresión	23
Figura 17. Ensayo realizado en la máquina	23
Figura 18. Especificaciones técnicas motor SINGER	25
Figura 19. Sujeción del embrague	26
Figura 20. Interruptor principal de la máquina	26
Figura 21. Cubierta plástica de protección.....	27
Figura 22. Disposición de fuerzas de la máquina de ensayos de fatiga	27
Figura 23. Disposición de fuerzas simplificada de la	28
Figura 24. Localización de los puntos A, B, C, D, E y F en la máquina	28
Figura 25. Diagrama de fuerza cortante real del sistema	29
Figura 26. Diagrama de momento flector real del sistema.....	29
Figura 27. Esfuerzo flector sinusoidal	30
Figura 28. Ubicación del punto H en la probeta de ensayo	31
Figura 29. Curva esfuerzo flector vs tiempo	31

Figura 30. Superficies de fractura por fatiga de flexión rotativa	32
Figura 31. Diagrama S-N para acero UNS G41300	32
Figura 32. Instalación VDF dentro de panel sin apertura de ventilación	43
Figura 33. Vista frontal – dimensiones gabinete).....	48
Figura 34. Vista lateral – dimensiones gabinete	49
Figura 35. Disposición componentes dentro de gabinete	50
Figura 36. Disposición componentes puerta gabinete	51
Figura 37. Isometría - Automatización de la Máquina de Ensayos de Fatiga	52
Figura 38. Vista frontal - soporte y gabinete	54
Figura 39. Vista lateral - soporte y gabinete	55
Figura 40. Diagrama de carga	56
Figura 41. Diagrama esfuerzo cortante.....	57
Figura 42. Diagrama momento flector.....	57
Figura 43. Sección perfil	58
Figura 44. Distancia 'y'	59
Figura 45. Soporte motor	60
Figura 46. Simulación del esfuerzo en base	61
Figura 47. Desplazamiento generado	61
Figura 48. Factor de seguridad	61
Figura 49. Vista isométrica - sensor de distancia.....	63
Figura 50. Vista frontal - sensor de distancia	63
Figura 51. Sujeción celda de carga.....	63
Figura 52. Vista superior - perforación placa inferior	64
Figura 53. Vista frontal - perforación placa inferior	64
Figura 54. Coupling.....	65
Figura 55. Vista lateral – interior coupling.....	65
Figura 56. Vista frontal – interior coupling.....	65
Figura 57. Motor trifásico de inducción convencional	68
Figura 58. Circuito equivalente por cada fase de un motor.....	69
Figura 59. Disposición de los devanados dentro del estator.....	71
Figura 60. Motor de inducción de rotor devanado.....	72

Figura 61. Motor de inducción de rotor de jaula de ardilla	73
Figura 62. Diagrama de bloques de una fuente de poder	81
Figura 63. Pulsador de emergencia	84
Figura 64. Diagrama funcionamiento paro de emergencia	84
Figura 65. Luces piloto.....	85
Figura 66. Bornera para riel din	86
Figura 67. Definición de puerto serial de la pantalla táctil HMI	92
Figura 68. Puerto de comunicación RS-485 VDF	92
Figura 69. Forma de construcción de un cable Ethernet cruzado.....	93
Figura 70. Disyuntores magnetotérmicos	94
Figura 71. Sensor inductivo de proximidad.....	96
Figura 72. Circuito de acondicionamiento tipo puente de Wheatstone	98
Figura 73. Celda de carga de un solo punto	98
Figura 74. Celda de carga de compresión	99
Figura 75. Celda de carga tipo S	99
Figura 76. Especificaciones técnicas celda de carga.....	102
Figura 77. Fases para acondicionamiento de una señal.....	103
Figura 78. Disposición de galgas extensiométricas	104
Figura 79. Diagrama de conexión	104
Figura 80. Circuito de acondicionamiento	106
Figura 81. Encoder rotacional	106
Figura 82. Estructura simplificada de un encoder incremental	107
Figura 83. Estructura simplificada encoder absoluto	107
Figura 84. Especificaciones técnicas encoder	108
Figura 85. Red industrial propuesta	109
Figura 86. Pantalla táctil HMI	110
Figura 87. Diagrama eléctrico de un variador de frecuencia.....	113
Figura 88. Entrada y salida de un variador de frecuencia.....	114
Figura 89. Diagrama de un Control Escalar V/F	115
Figura 90. Curva frecuencia vs torque	115
Figura 91. Diagrama control vectorial	116
Figura 92. Panel de control VDF.....	116

Figura 93. Módulo de entradas VDF	117
Figura 94. Comunicación de un dispositivo inteligente (PLC) con tres variadores de frecuencia.....	117
Figura 95. Controlador lógico programable.....	121
Figura 96. Diagrama de un sistema de control clásico	126
Figura 97. Diagrama general del sistema de control para el arranque y velocidad del motor	128
Figura 98. Diagrama general del sistema de control para la detención del de la máquina al finalizar el ensayo	131
Figura 99. Descripción lógica ladder.....	131
Figura 100. Metodología de desarrollo de una HMI	133
Figura 101. Arquitectura HMI para ensayo de fatiga.....	134
Figura 102. Distribución de elementos dentro de la pantalla	134
Figura 103. Pantalla de inicio DOPSoft.....	137
Figura 104. Crear un nuevo proyecto	137
Figura 105. Elección del modelo de pantalla	138
Figura 106. Opciones de comunicación.....	138
Figura 107. Entorno de trabajo	139
Figura 108. Pantalla HOME	141
Figura 109. Pantalla de proceso	141
Figura 110. Pantalla alineación.....	142
Figura 111. Pantalla frecuencia de motor	142
Figura 112. Pantalla diámetro de motor.....	143
Figura 113. Pantalla gráfica esfuerzo flector.....	143
Figura 114. Pantalla de alarmas	144
Figura 115. Pantalla de ensayo finalizado	144
Figura 116. Gabinete empotrado	145
Figura 117. Interior de la caja de control.....	146
Figura 118. Motor instalado sobre el soporte.....	146
Figura 119. Bocín adaptado en matrimonio	148
Figura 120. Sensor de distancia instalado	148
Figura 121. Guías para el sensor de distancia	149

Figura 122. Acondicionamiento celda de carga	149
Figura 123. Vista frontal - couplin	150
Figura 124. Vista lateral - couplin.....	150
Figura 125. Acople motor-encoder.....	150
Figura 126. Despiece - acople motor-encoder	151
Figura 127. Acople motor-encoder.....	151
Figura 128. Protección encoder	152
Figura 129. Placa de motor WEG	153
Figura 130. Layout de la placa de identificación para carcasas 63 a 132..	153
Figura 131. Acoplamiento motor – encoder - máquina	155
Figura 132. Toma trifásica - Laboratorio	156
Figura 133. Conector trifásico	156
Figura 134. Datos fuente de poder	157
Figura 135. Conexión pulsador de emergencia	157
Figura 136. Conexión luces piloto.....	159
Figura 137. Borneras	159
Figura 138. Instalación RS-485 en HMI	162
Figura 139. Instalación RS-485 en VDF	162
Figura 140. Cable Ethernet.....	163
Figura 141. Disyuntores, de izquierda a derecha: tripolar, bipolares	164
Figura 142. Sensor de distancia	164
Figura 143. Celda de carga acoplada	165
Figura 144. Placa acondicionamiento celda de carga.....	166
Figura 145. Caja para acondicionamiento	166
Figura 146. Respuesta de la celda de carga acondicionada	167
Figura 147. Pantalla táctil HMI instalada.....	168
Figura 148. Variador de frecuencia instalado	169
Figura 149. PLC instalado	170
Figura 150. Pantalla 1 Home	171
Figura 151. Pantalla 2 Proceso.....	171
Figura 152. Pantalla 3 Curva	172
Figura 153. Pantalla 4 Alarmas.....	172

Figura 154. Pantalla 5 Velocidad Motor	173
Figura 155. Pantalla 6 Diámetro Probeta	173
Figura 156. Pantalla 7 Carga Probeta.....	174
Figura 157. Pantalla 8 Ensayo Finalizado.....	174
Figura 158. Pantalla 9 Datos Curva	175
Figura 159. Captura 1	175
Figura 160. Captura 2	176
Figura 161. Captura 3	177
Figura 162. Captura 4	178
Figura 163. Captura 5	179
Figura 164. Captura 6	180
Figura 165. Captura 7	181
Figura 166. Captura 8	181
Figura 159. Título del programa y segmento 1	182
Figura 160. Segmento 2	183
Figura 161. Segmento 3	183
Figura 162. Segmento 4	183
Figura 163. Segmento 5	183
Figura 164. Segmento 6	184
Figura 165. Segmento 7	184
Figura 166. Segmento 8	185
Figura 167. Segmento 9	185
Figura 168. Segmento 10	185
Figura 169. Segmento 11	186
Figura 170. Segmento 12	186
Figura 171. Segmento 13	186
Figura 172. Segmento 14	187
Figura 173. Segmento 15	187
Figura 174. Segmento 16	187
Figura 175. Segmento 17	188

RESUMEN

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE cuenta entre sus laboratorios con el de Mecánica de Materiales en el cual se realizan diferentes tipos de ensayos de carácter destructivo mismos que se ejecutan sobre máquinas específicas para el estudio de fenómenos que ocurren en diferentes tipos de materiales, uno de estos ensayos es el de fatiga en acero el cual se encarga de identificar el número de ciclos y el esfuerzo máximo que soporta una probeta de acero sometida a flexión rotativa. La máquina que realiza dicho ensayo cuenta con un tipo de motor monofásico que necesita ser embragado para iniciar el ensayo y para ello se ha colocado ingeniosamente un perno que sostenga el embrague, adicional a esto la máquina no cuenta con un sistema de pesaje y de conteo de revoluciones; parámetros fundamentales a conocer en el ensayo de fatiga, tampoco posee un sistema de apagado automático cuando el ensayo a finalizado haciéndola peligrosa para el uso de los estudiantes, es por todas las razones mencionadas que surge la necesidad de automatizar dicha máquina y dotarla de todas las prestaciones de las cuales carece. El desarrollo del proyecto mencionado será una contribución para el campo de la automatización y control en maquinarias de laboratorio.

Palabras Clave

- **MECÁNICA DE MATERIALES**
- **ENSAYO DE FATIGA**
- **PROBETA DE ACERO**
- **FLEXIÓN ROTATIVA**
- **AUTOMATIZACIÓN**

ABSTRACT

The Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE counts among its laboratories the one of Mechanics of Materials in which different types of destructive tests are carried out that are executed on specific machines for the study of phenomena that occur in different types of materials, one of these tests is the one of fatigue in steel which is in charge of identifying the number of cycles and the maximum strain that supports a steel specimen subjected to rotary flexion. The machine that performs this test has a single-phase motor type that needs to be clamped to start the test and for this a pin has been placed ingeniously to hold the clutch, in addition to this the machine does not have a system of weighing and counting of revolutions; fundamental parameters to be known in the fatigue test, neither does it have a system of automatic shutdown when the test finished making it dangerous for the use of the students, is for all the mentioned reasons that arises the necessity to automate this machine and endow it with all the benefits which lacks. The development of the mentioned project will be a contribution for the field of automation and control in laboratory machinery.

Keywords

- **MECHANICS OF MATERIALS**
- **FATIGUE TEST**
- **STEEL SPECIMEN**
- **ROTARY FLEXION**
- **AUTOMATION**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

1.1.1. Antecedentes

El Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE ha funcionado como medio y herramienta para forjar profesionales en las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica impartiendo asignaturas como: Mecánica de Materiales, Diseño de Elementos de Máquinas, Diseño Mecánico, entre otras, enfatizando la parte práctica de la ingeniería. Atendiendo a esta necesidad y conforme al desarrollo tecnológico de la época, el laboratorio requiere de maquinaria para ensayos destructivos de materiales con un importante grado de automatización.

Un ensayo de fatiga tiene por objeto analizar las características mecánicas de los materiales cuando se someten a cargas variables o dinámicas, mismas que producen en ellos esfuerzos variables, repetidos, alternantes o fluctuantes; en muchos casos ocurre que los elementos de máquinas fallan bajo la acción de este tipo de esfuerzos ya que se ha observado que la magnitud de los esfuerzos reales máximos al momento de la rotura estuvieron por debajo de la resistencia última del material y con mucha frecuencia incluso por debajo de la resistencia a la fluencia, por lo tanto la razón de estas fallas radica en que los esfuerzos se repitieron un gran número de veces, es decir las piezas estuvieron sometidas a esfuerzos variables. Este tipo de falla es lo que se conoce como *falla por fatiga*, y es de extrema importancia su análisis puesto que ocurren de forma repentina y total, son impredecibles a diferencia de las fallas por cargas estáticas donde se aprecia una deformación plástica previa que da un indicio de rotura; así que son sumamente peligrosas si ocurren dentro de un sistema o estructura mecánica.

Desde la antigüedad se tenía conocimiento que los materiales se rompen con mayor facilidad cuando se someten a cargas variables a diferencia de cuando se someten a cargas constantes o estáticas. Los estudios de fatiga se iniciaron en el siglo XIX con la finalidad de analizar y comprender la ruptura repentina de ciertos elementos mecánicos, como piezas de ferrocarril. El ingeniero alemán August Wöhler entre 1852 y 1870, fue quien realizó la primera investigación sistemática del fenómeno de fatiga construyendo diversas máquinas y realizando ensayos con piezas de ferrocarril sometidas a esfuerzos variables, introdujo el concepto de límite de fatiga que se encuentra muy por debajo del límite de fluencia y trazó el diagrama de Wöhler que se conoce hoy en día como Diagrama S-N.

A inicios del siglo XX los ingenieros escoceses J. A. Ewing y J.C. Humfrey observaron que si se supera el límite de proporcionalidad con carga estática, aparecen un deslizamiento de algunos planos cristalinos del material similares a los que aparecen cuando se somete a tensiones de fatiga luego de varios ciclos.

Hoy en día el análisis de fatiga se ha convertido en uno de los campos más activos de la investigación y desarrollo de las ingenierías estructurales, científicos e ingenieros han aportado mucho al entendimiento del fenómeno de fatiga, sin embargo todavía no se tiene un conocimiento completo y dependiendo de un contexto estadístico y empírico para la predicción de fallas.

En el estudio teórico de fatiga las ecuaciones que dispone ofrecen una guía bastante acertada para predecir como las siguientes: la *Ley de Paris* (1961) creada por los ingenieros estadounidenses Paul C. Paris, Mario P. Gomez y William E. Anderson; *Hipótesis de Daño Lineal de Palmgren-Miner* o *Regla de Miner* (1945) originalmente propuesta por el sueco A. Palmgren quien publicó dicho método en alemán en el año de 1924. Por supuesto siempre se requerirá de un sustento práctico a través de ensayos que determinen las características mecánicas de los materiales cuando se exponen al fenómeno de fatiga para predecirla convenientemente y

minimizar la ocurrencia de fallos catastróficos en piezas y estructuras mecánicas.

En cuanto se refiere a la automatización se tiene conocimiento que desde la Edad Antigua, varias civilizaciones como la egipcia, la griega y la china desarrollaron ciertos mecanismos que imitaban los movimientos de los seres vivos, hacia el año 400 a. C. el filósofo griego Arquitas de Tarento (428 a. C.-347 a. C.) construyó un autómeta que se trataba de una paloma conectada a un contrapeso a través de una polea, la cual simulaba volar trasladándose desde abajo hacia arriba mediante la acción de una corriente de aire, fue el primero en describir los fenómenos físicos mediante los principios matemáticos, razón por la cual es considerado el padre de la Ingeniería Mecánica, se le atribuye el invento de la polea y el tornillo según afirma el diario mexicano El Universal (2000); Herón de Alejandría ingeniero y matemático griego, de quién se discrepa acerca de la fecha de su nacimiento siendo la teoría más aceptada la que vivió en el siglo I d. C., se le atribuye la invención de la primera máquina de vapor de la historia que consistió de una esfera que giraba por acción del vapor de agua, se dice que inventó la leva y construyó grandes inventos como un dosificador automático de vino, publicó la obra "La Neumática" siendo uno de los primeros tratados de mecánica de la historia, y la obra "Teatro de Autómetas" donde los protagonistas no eran personas sino muñecos mecánicos con movimiento propio, constituyéndose en el primer libro de robótica de la humanidad, razón por la cual se puede decir que fue el padre de la Robótica.

En la Edad Media el ingeniero árabe de origen kurdo Al Jazari (1136-1206) inventó un reloj de gran precisión, completamente automatizado y programable para el verano donde los días son más largos y el invierno donde son más cortos, dicho reloj bien podría ser el primer controlador programable del mundo, poco antes de su muerte en el año 1206 escribió un tratado sobre alrededor de 150 ingeniosos aparatos mecánicos en el que exponía en detalle su funcionamiento, una copia de este tratado se encuentra actualmente en la biblioteca de Topkapi en Estambul, Turquía.

En el Renacimiento se producen grandes invenciones como las del célebre personaje Leonardo Da Vinci (1452-1519) quien diseñó y construyó un robot mecánico autopropulsado, totalmente automatizado y programable con forma de león, este artefacto era un obsequio para el rey Francisco I de Francia así que se soltó en el salón del trono, se dirigió hacia el monarca, al llegar cerca de Francisco I se paró sobre sus patas traseras, abrió su pecho y apareció un ramo de flores que era dirigido para el rey ante la atónita mirada de los presentes, lamentablemente los planos de esta obra de ingeniería se perdieron, Leonardo diseñó también el que quizá fue el primer robot humanoide de la historia cuya carcasa era la armadura de un caballero medieval y en su interior se encontraba instalado un juego de engranajes y cuerdas que hacían mover sus extremidades a tal punto de reproducir casi en su totalidad el movimiento de un ser humano.

La automatización como herramienta importante de la ingeniería se puede decir que ve la luz con la revolución industrial a finales del siglo XVIII en Reino Unido y décadas más tarde a principios del siglo XIX en el resto de Europa occidental y Estados Unidos, donde se reemplazó la fuerza humana y animal por la de las máquinas dando origen así a las fábricas contemporáneas, este evento produjo un cambio profundo y avance significativo en materia económica, tecnológica y social sin precedentes en la historia de la humanidad (Montenegro González, 1997).

Hasta este período de la historia la fuente de energía de las máquinas y dispositivos eran netamente de naturaleza mecánica, con el desarrollo de la electrónica, el concepto de automatización industrial evoluciona y pasa a estar íntimamente ligado a la Ingeniería de Control. En 1904 el físico e ingeniero británico John Ambrose Fleming inventa el diodo de tubo de vacío, en 1906 el ingeniero estadounidense Lee De Forest, quien es considerado el padre de la Electrónica, inventa el triodo a partir del diodo de Fleming, constituyéndose en el primer amplificador de señales, en 1947 los físicos estadounidenses William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain inventan el transistor, elemento base de la mayoría de artefactos electrónicos de la actualidad; el aprovechamiento de las características eléctricas de los

materiales semiconductores, especialmente el silicio, permitió el desarrollo de dispositivos electrónicos de estado sólido que presentan un notable avance respecto a sus antecesores, los dispositivos de tubos de vacío, en lo que respecta a la velocidad de transmisión, confiabilidad y sobretodo la miniaturización puesto que la tendencia de la electrónica es fabricar dispositivos cada vez más pequeños; en 1954 se produjo el primer transistor de silicio y desde entonces ha sido popularizado hasta el día de hoy; para el año de 1958 Jack St. Clair Kilby, físico estadounidense, desarrolla el primer circuito integrado mientras trabajaba en Texas Instrument cimentando la base de los microprocesadores y microcontroladores.

Paralelamente las industrias con el fin de mejorar su productividad implementaron este nuevo tipo de automatización en sus procesos, adquiriendo la nueva clase de maquinaria que funciona en gran parte con energía eléctrica, sin embargo conforme las máquinas y los procesos de automatización se tornaban más complejos, el cableado y la circuitería se volvían demasiado extensos, además los circuitos integrados y transistores no controlan la colosal cantidad de energía que maneja una máquina industrial, por lo tanto surgió la necesidad de crear un dispositivo capaz de controlar un valor significativo de energía en un espacio físico pequeño, entonces en el año de 1968 la empresa Hydramatic, encargada de fabricar transmisiones automáticas para la General Motors, ofertó un concurso con el objetivo de satisfacer esta necesidad, la propuesta ganadora fue el dispositivo denominado Modicon (MODular DIgital CONtroller, Controlador Digital Modular por sus siglas en inglés) producido por la empresa Bedford Associates, el cual reemplazó el extenso número de cables y relés por líneas de código de programación; este invento que posteriormente fue llamado Modicon084 por ser el proyecto número 84 del concurso, fue el primer PLC de la historia.

El PLC (Programmable Logic Controller, Controlador Lógico Programable por sus siglas en inglés) llamado también Autómata Programable se compone de circuitos integrados en su interior, por esta razón otorga gran flexibilidad en lo que se refiere a tamaño, velocidad de

transmisión y procesamiento de datos, capacidad de ejecutar varias tareas a la vez, lectura de variables en tiempo real, etc., además es robusto y diseñado para ambientes industriales, permite el control de diversos tipos de máquinas y procesos que consuman valores elevados de energía, por ello constituye el principal componente de la automatización industrial en la actualidad; en un principio la forma de comunicación entre el operador y el PLC constaba únicamente de pulsadores, selectores, indicadores eléctricos o luces piloto e indicadores analógicos, pero hoy en día se cuenta con sofisticadas formas de monitorear y controlar al PLC como por ejemplo a través de pantallas touch screen, a esto se le llama HMI (Human Machine Interface, Interfaz Humano-Máquina en su traducción del inglés).

1.1.2. Justificación

El profesional en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE según su perfil profesional (Mecatrónica ESPE, 2016) está facultado entre otras capacidades para:

- Diseñar equipos y sistemas mecatrónicos utilizando herramientas computacionales y satisfaciendo requisitos de calidad, seguridad y economía tomando en cuenta códigos y normas técnicas nacionales e internacionales.
- Automatizar e innovar equipos y sistemas de producción de bienes y servicios para mejorar la productividad, utilizando los últimos avances tecnológicos.

Dada la importancia que tiene el sustento práctico en el estudio de fatiga que se realiza por medio de ensayos, es necesario que en el laboratorio de Mecánica de Materiales exista una máquina que cumpla con tal propósito y presente un grado de automatización acorde con los avances tecnológicos de la época. El laboratorio cuenta con la máquina denominada: “Máquina de Ensayo de Metales Sometidos a Fatiga por Flexión Rotativa con Capacidad de 30 kgf-m” diseñada y construida por (Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004). Sin embargo presenta algunos inconvenientes en su funcionamiento como son: avería en el sistema de conteo de revoluciones

del motor, carencia de control y monitoreo sobre el proceso y sus componentes, falta de protecciones de carácter industrial como un paro de emergencia, un improvisado sistema de embrague y detención de la máquina al momento de finalizar el ensayo.

En vista de esta necesidad, resulta oportuno automatizar la máquina para corregir sus falencias e incorporar mayores prestaciones como la visualización de la curva del esfuerzo flector, que se produce en la probeta, respecto al tiempo; contribuyendo así con la repotenciación de los equipos del laboratorio y la modernización de las prácticas para los estudiantes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de control que permita la automatización de la máquina de Ensayos de Fatiga del laboratorio de Mecánica de Materiales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer un diagnóstico del estado actual de la máquina como punto de partida para el desarrollo del proyecto.
- Diseñar e implementar acondicionamientos mecánicos y electrónicos que garanticen robustez al sistema.
- Diseñar una interfaz humano-máquina mediante la cual se controle y monitoree los parámetros de ensayos de fatiga según las normas estipuladas por la ASTM.
- Desarrollar un protocolo de pruebas con la finalidad de obtener resultados satisfactorios tanto en la operación de la máquina como en los ensayos de fatiga.

1.3. Alcance

Disponer de una máquina de ensayos de fatiga automatizada cuya operación sea segura y genere resultados confiables de acuerdo a la norma ASTM E606 y E466; se elaborará el respectivo manual de usuario y la guía de práctica para los estudiantes. Se añadirán a la máquina una serie de elementos que son:

1.3.1. Componentes mecánicos

- **Caja de control:** En esta caja o gabinete se instalará los dispositivos que automatizarán la máquina como son: la pantalla táctil, los elementos de control y algunos elementos electrónicos.
- **Soporte para caja de control:** La caja de control se adaptará cerca de la máquina y en un lugar que sea de fácil acceso para el operador, por lo tanto se construirá la estructura mecánica conveniente para su instalación.
- **Acoplamientos mecánicos para los componentes eléctricos y electrónicos:** Se adecuarán accesorios para la colocación de sensores y demás componentes eléctricos y electrónicos que deban permanecer fuera de la caja de control como es el caso del motor y el cableado.

1.3.2. Componentes eléctricos y electrónicos

- **Motor trifásico de inducción:** Se optó por reemplazar el motor monofásico que se encuentra actualmente en la máquina por uno trifásico debido a que tiene una mejor capacidad de control.
- **Sensores:** Se implementarán tres sensores en el sistema:
 - **Sensor de distancia:** Que se instalará con el fin de detener el sistema al momento de la rotura de la probeta.
 - **Celda de carga:** Cuyo propósito será el de transmitir la información del esfuerzo flector que soporta la probeta durante el ensayo, misma

que será procesada y enviada a la pantalla táctil de forma que reproduzca la curva del esfuerzo en función del tiempo.

- **Encoder:** El cual medirá la velocidad real del motor y permitirá realizar el conteo de revoluciones.
- **Circuitos de acondicionamientos:** Estos circuitos serán los encargados de adecuar la señal emitida por los sensores para su correcto procesamiento por parte del PLC.
- **Circuito de alimentación:** Este circuito transmitirá potencia a todos los elementos eléctricos y electrónicos del sistema clasificando el tipo de energía que necesitan, por ejemplo la pantalla táctil HMI y los sensores requerirán 24 VDC por lo que se implementará una fuente de poder comercial, el motor y el variador de frecuencia trabajarán con alimentación trifásica de 220 V que dispone el laboratorio de Mecánica de Materiales, el PLC se alimenta con 220 VAC.
- **Protecciones eléctricas:** Se dimensionarán e implementarán disyuntores para salvaguardar los dispositivos ante una posible sobrecarga y/o cortocircuito.

1.3.3. Componentes del sistema de control

Los dispositivos que constituyen el controlador son en esencia los que conforman la red industrial (sección 3.4.1) y se detallan a continuación:

- **PLC:** Se optó por esta alternativa por sus características de carácter industrial que son: robustez, ejerce un control a alta velocidad, interpreta y procesa con precisión señales analógicas y digitales y se puede establecer una comunicación eficiente con los demás componentes de la red industrial.
- **Variador de Frecuencia (VDF):** Servirá para ejercer el control sobre el motor trifásico, una característica importante de este dispositivo es su interfaz de comunicación RS-485 que es compatible con la mayoría de controladores y dispositivos HMI.

- **HMI Pantalla Táctil:** Con el objetivo de lograr una interfaz intuitiva de fácil operación para el usuario, se optó por una pantalla táctil con alta resolución de color, con tecnología de última generación. La pantalla táctil se comunicará con el VDF mediante la interfaz RS-485 y con el PLC a través de Ethernet.

Para el arranque y la velocidad del motor se hará un control en lazo abierto puesto que el VDF regula su funcionamiento según los parámetros fijados. La acción de detención del motor por consecuencia de la rotura de la probeta será efectuada por un control On-Off o control todo y nada.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

Como se ha mencionado en el capítulo 1, no fue hasta el año 1852 con la llegada del ingeniero alemán August Wöhler que se empezó a realizar ensayos de fatiga por flexión rotativa, que años más tarde se convirtió en estándar para la Ingeniería de Materiales.

Desde entonces se han realizado nuevas máquinas y automatizaciones con nuevas tecnologías al servicio de este tipo de ensayos destructivos en varios países del mundo.

Se han realizado automatizaciones a máquinas de ensayos de fatiga en Sudamérica en países como Venezuela y Colombia. En el año 2006 fue presentado en la Facultad de Ingenierías Físico Matemáticas de la Universidad Industrial de Santander de la ciudad de Bucaramanga, Colombia el trabajo de grado: “Diseño y Construcción de una Máquina de Fatiga Automatizada para el Estudio de Materiales con Memoria de Forma” (ver figura 1), cuyo propósito fue realizar investigaciones de fatiga en biomateriales y efectuar estudios en probetas de nitinol (Aleación Níquel-Titanio) utilizados en implantes cardiovasculares (Orejuela Sandoval, 2006).

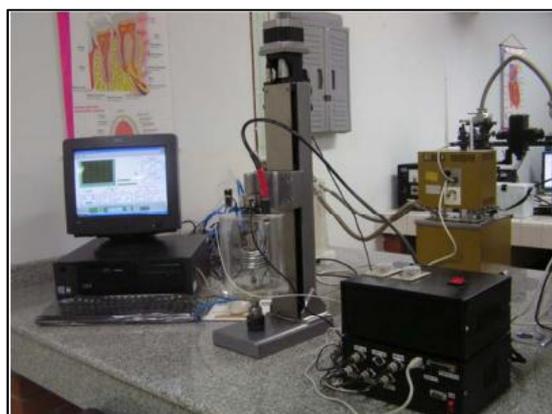


Figura 1. Máquina Conjunto
Fuente: Orejuela Sandoval (2006)

Más tarde el año 2009 fue presentado en el Instituto Universitario Experimental de Tecnología La Victoria ubicado en el estado de Aragua,

Venezuela el trabajo de grado titulado: “Rediseño y Automatización de la Máquina de Ensayos de Fatiga por Flexión Rotativa”, dicha máquina se encontraba inoperativa y lo que se propuso fue convertirla en un sistema mecatrónico que procese la información en tiempo real y opere de modo eficaz sin que se produzcan desajustes por vibración y que la carga que genera flexión en la probeta no se aplique de modo manual sino que se haga automáticamente según un ciclo que programable (Jiménez, 2009) En la figura 2 se aprecia una fotografía de esta máquina detallando sus componentes principales.

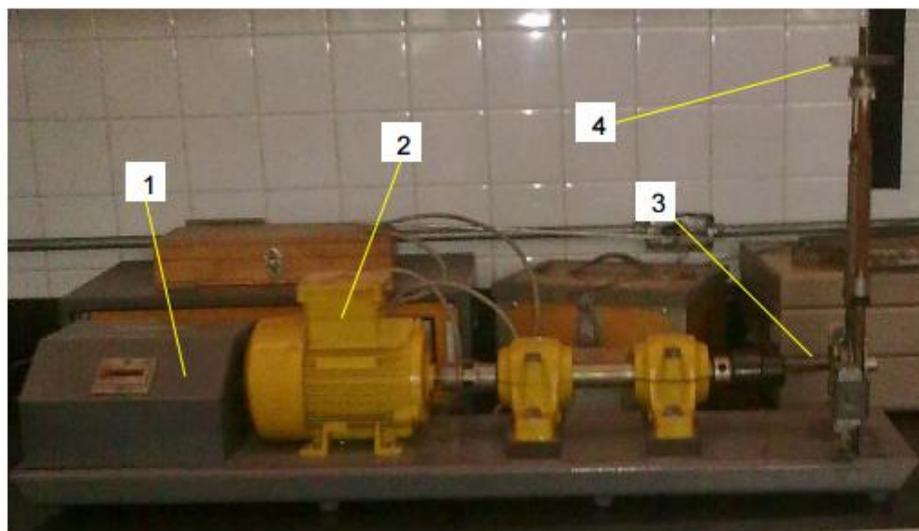


Figura 2. Máquina de ensayos de fatiga

Fuente: Jiménez, G. (2009)

- Dónde:
- 1: Tacómetro
 - 2: Motor
 - 3: Soporte de probetas
 - 4: Control de aplicación de carga

En Ecuador durante el año 2010 se presentó en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito, Ecuador el trabajo de grado: “Diseño de un Sistema de Control y Automatización de una Máquina Axial-Torsional de Ensayo de Materiales”. Este equipo permite realizar ensayos estáticos y dinámicos de tipo axial y torsional, así como ensayos de fatiga para determinar

propiedades mecánicas de los materiales (Aragullin López & Mejía Cholo, 2010).

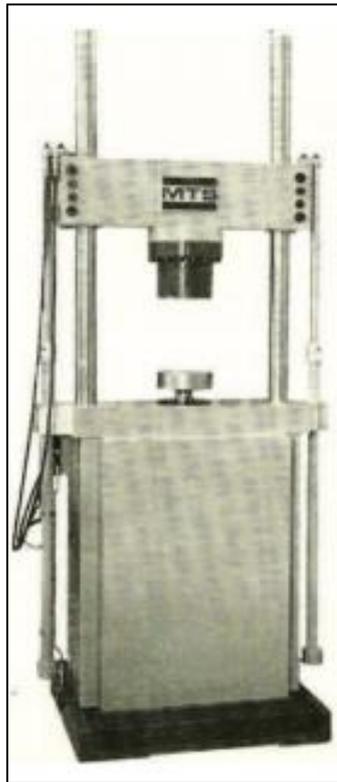


Figura 3. Máquina de ensayos de materiales
Fuente: Aragullin López & Mejía Cholo, 2010

En la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE se han automatizado, diseñado y rediseñado equipos para sus laboratorios como por ejemplo en el 2015 el trabajo de grado: “Diseño y Construcción de un Equipo para Prácticas de Flexión de Vigas para el Laboratorio de Mecánica de Materiales”. Este equipo automatizado de flexión de vigas es un sistema de adquisición de datos mediante el cual se obtiene valores precisos de los parámetros de carga y desplazamiento, en los que se ha reemplazado elementos como los dinamómetros por celdas de carga y el comparador de reloj por un potenciómetro lineal, con ello se busca la implementación de una nueva tecnología en el laboratorio (Pavón López, 2015).



Figura 4. Equipo de flexión de vigas
Fuente: Pavón López, 2015

2.1. Máquinas de ensayos de fatiga convencionales

2.1.1. Máquina de ensayos de fatiga tipo viga en voladizo

En este tipo de máquinas, un motor eléctrico hace girar una probeta cilíndrica a 1800 RPM mientras que el contador simple guarda el número de ciclos efectuados por la probeta. La carga es aplicada en el centro de la probeta. El momento que esta falla, la máquina que cuenta con un interruptor apaga el sistema y hace que los pesos desciendan (Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011).

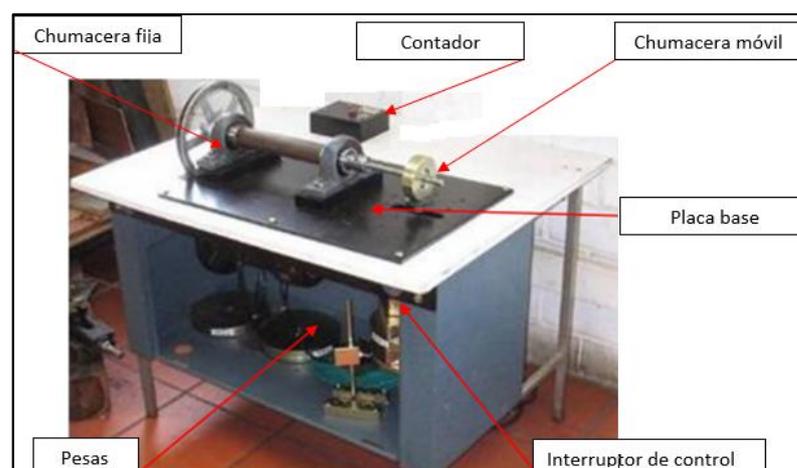


Figura 5. Máquina de ensayos de fatiga tipo viga en voladizo
Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011

Partes de la máquina:

- **Chumacera fija:** Este elemento ayuda a sujetar la probeta en un extremo.

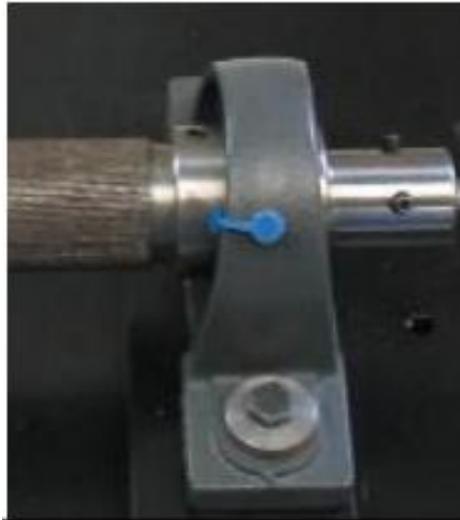


Figura 6. Chumacera fija

Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011

- **Eje de rotación:** El eje de rotación es impulsado por un motor eléctrico que mueve una polea, ésta es controlada mediante dos interruptores. Un interruptor maneja el contador de ciclos, y el otro al activarse permite el funcionamiento rotativo; éste último es desactivado (figura 7) cuando los pesos caen sobre él, es decir cuando ha ocurrido la fractura de la pieza por fatiga.



Figura 7. Eje de rotación

Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011



Figura 8. Sistema de pesas

Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011

Contador de ciclos: Éste instrumento permite definir la cantidad de giros o ciclos a los que fue sometida la probeta.



Figura 9. Contador

Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011

Chumacera de carga móvil: Este elemento de la máquina permite ajustar la longitud a la cual será colocada la carga en la probeta; además de sujetar el peso que se le aplicará al material.

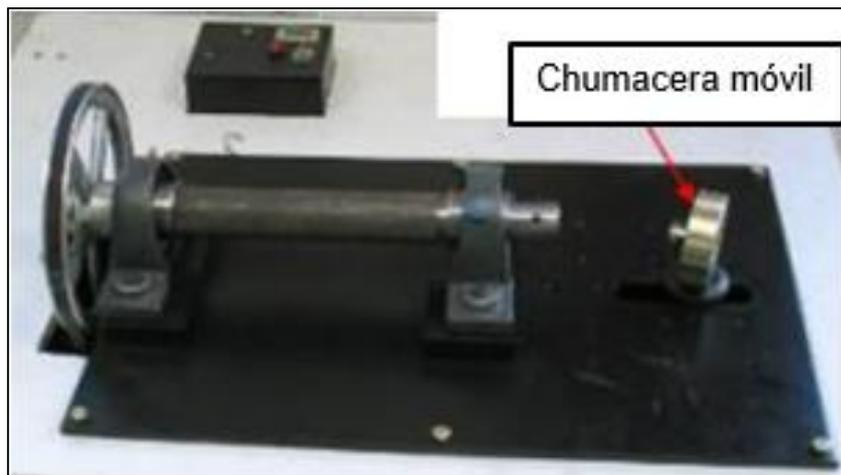


Figura 10. Chumacera móvil
Fuente: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011

- **Placa base:** Su función es fijar la polea y el sistema mecánico, entre ellos la chumacera fija, el eje de rotación, el motor, la chumacera de carga móvil y la probeta. Permitiendo además controlar la ubicación de la chumacera móvil y por ende la longitud a la cual se desarrollará el ensayo.
- **Soportes de la probeta:** Los soportes colocados en las respectivas chumaceras fija y móvil, sirven para sujetar la probeta y fijarla cuando ésta ya está lista a la distancia establecida, de tal manera que la probeta gire alineada al eje de rotación durante el ensayo de fatiga.

2.1.2. Máquina de ensayos de fatiga tipo R. R. Moore

De este tipo es la máquina que se encuentra en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y que es objeto del presente proyecto de titulación.



Figura 11. Máquina de ensayos de fatiga - ESPE

El funcionamiento de este tipo de máquina, que fue diseñado por R. R. Moore en 1919 (Avilés, 2015), se resume en un motor eléctrico conectado a un eje de transmisión mediante un acople flexible que permite la transmisión de movimiento al sistema; tiene dos partes, en la primera el eje está apoyado en dos chumaceras, la una sirve de soporte y la otra de pivote, en su sección final tiene adaptado una mordaza mecánica que sujeta a la probeta, la otra parte de la máquina es simétrica a la explicada con otras dos chumaceras, contando con cuatro chumaceras en total, la diferencia de esta parte es que el eje no está conectado a ningún dispositivo como un motor o acople, el movimiento de la misma está supeditado al de la probeta.

La probeta está sometida a flexión mediante la aplicación de la carga realizada por el pistón con ubicación vertical en caso de grandes cargas (mayores a 50kg) o mediante pesos cuando las cargas son pequeñas (menores o iguales a 50kg), dicha carga está dividida en partes iguales a las chumaceras pivote mediante la placa de transmisión de fuerza; el pistón cuenta con un manómetro que da lectura de la presión traducida en fuerza, por facilidad del usuario se ha realizado una carta de calibración del pistón,

ésta contiene valores exactos de fuerza correspondientes a distintas lecturas de presiones del manómetro. (Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004).

El cuentapulsos adaptado al motor permite visualizar el número de ciclos que se obtienen hasta el instante de falla de la probeta por acción del esfuerzo flector; el esfuerzo de torsión resultante por la fricción de los rodamientos se considera como despreciable. Al girar media revolución la probeta, un punto de la viga arriba del eje neutro pasa de tener un esfuerzo de compresión a tener un esfuerzo de tracción, la siguiente media revolución hace que los esfuerzos en dicho punto se inviertan, así se produce una secuencia cíclica de esfuerzos de compresión y tracción. (Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004).

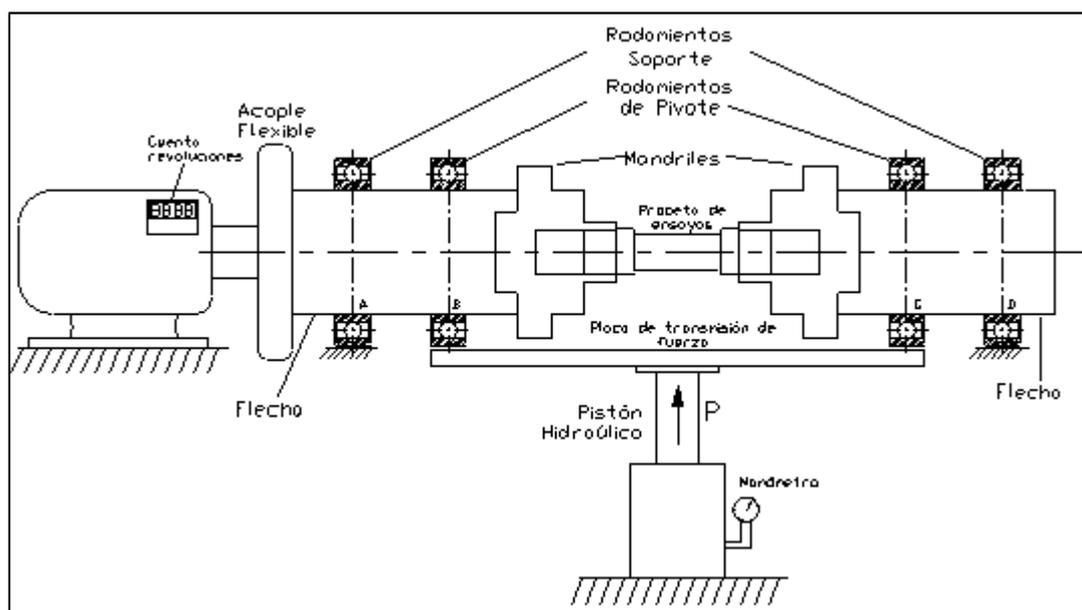


Figura 12. Bosquejo de una Máquina de Moore
Fuente: Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004

Las partes que este tipo de máquinas suelen tener son:

- **Estructura soporte:** Estructura metálica, recubierta con pintura anticorrosiva.
- **Mecanismo de aplicación de carga:** Aplicación de carga mediante pesas para bajas cargas ($\leq 50\text{kg}$) y mediante pistón hidráulico vertical (incluye manómetro) para cargas altas ($50\text{kg} < P \leq 300\text{kg}$).

- **Rodamientos:** Chumaceras autoalineantes KDF tanto en soportes como en pivotes.
- **Contador de revoluciones:** Digital (8 dígitos).
- **Mordazas:** Tipo mandril, ajustables mediante sistema mecánico-manual (llaves).
- **Motor:** Monofásico (potencia: 0.3 HP, velocidad máxima 1725 rpm).
- **Acople flexible:** Comúnmente denominados matrimonios, se emplean para transmitir torque con suavidad y corregir la pequeña desalineación que se produce por la flexión del eje.
- **Control:** Sistema mecánico de apagado de la máquina, manómetro de presión (cuantificador de fuerza), sensor inductivo de conteo de revoluciones.
- **Sistema de pruebas para materiales a altas temperaturas:** no contiene ningún sistema.

Este conjunto de elementos en específico, son con los que se diseñó y construyó la máquina que se encuentra en el laboratorio de Mecánica de Materiales. (Narváz Mejía & Terán Rosero, 2004, págs. 72-73).

2.2. Máquinas de ensayos de fatiga automatizadas

2.2.1. Máquina de ensayos de fatiga – FATIMAT (Fatigue In Materials)

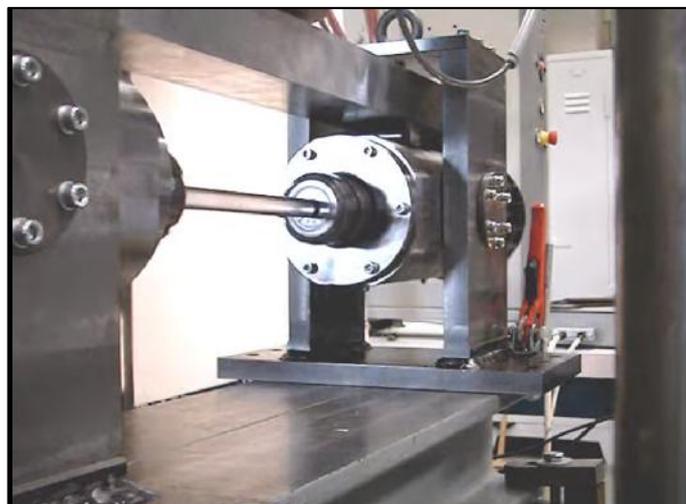


Figura 13. Máquina de ensayos de fatiga FATIMAT
Fuente: MOPTKaHo, 2009

La máquina de ensayos de fatiga FATIMAT es creada debido a la necesidad cada vez mayor de crear productos más ligeros, más fuertes y más baratos.

Los diseñadores tienen que estar cada vez más preocupados acerca de las propiedades de fatiga y confiabilidad de sus productos. La máquina de ensayos FATIMAT cuenta con actuadores electromecánicos de alta precisión y válvulas servo neumáticas, siendo éstas una de las alternativas más baratas a comparación de las máquinas de ensayos de fatiga servohidráulicas.

Un actuador electromecánico es aquel que transforma energía eléctrica en energía mecánica, ejemplos claros de este tipo de actuadores son los motores y bombas eléctricas, por otro lado las válvulas que se encuentran en la máquina FATIMAT utilizan un control servo neumático, este tipo de válvulas presentan mucha exactitud en aplicaciones tales como fuerza de sujeción de objetos producida por robots.

Este tipo de válvulas son capaces de controlar dirección y presión o dirección y flujo con una sola señal eléctrica.



Figura 14. Flexión en la probeta

Fuente: MOPTKaHo, 2009

La máquina utiliza un software de código abierto que se basa en el análisis de Weibull que es ampliamente utilizado hoy en día para el análisis

de datos, dicho análisis predice un futuro fallo en un producto. Este software ejecuta el movimiento rotatorio de la probeta, a la vez que el movimiento lineal de las mordazas dónde se encuentra fijada la probeta, estas mordazas se mueven de arriba a abajo como un pivote haciendo que la probeta se someta a flexión, que al añadirle movimiento rotatorio se convierte en flexión rotativa.

2.3. Máquinas de ensayos de fatiga de resorte

El funcionamiento de estas máquinas consiste de un motor que transmite el movimiento hacia un tambor, el cual está unido a una masa que sirve como guía y sujeción, el movimiento rotacional es transformado en horizontal a través de la masa y es transmitido al resorte el cual se comprime y se expande. Dicho movimiento del resorte es transmitido a la probeta, por lo que la probeta está sometida a varios ciclos de tracción y compresión por acción del resorte. Una celda de carga se encarga de captar las deformaciones producidas en la probeta y es procesado en un software.

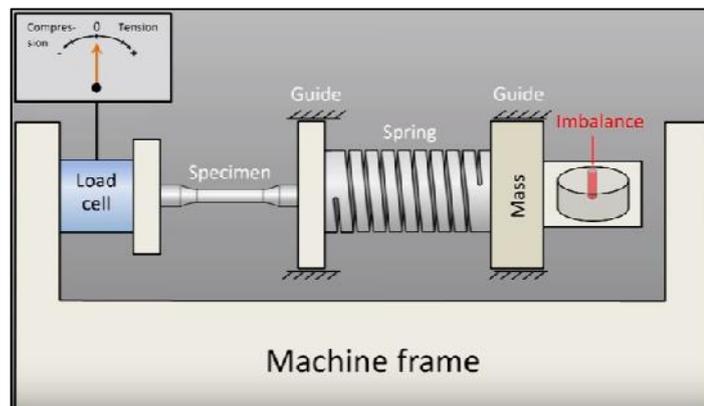


Figura 15. Funcionamiento de la máquina de ensayos de fatiga de resorte

Fuente: MaterialsScience, 2014

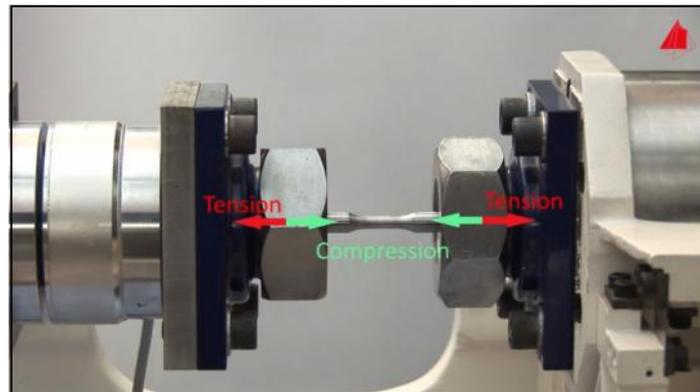


Figura 16. Esfuerzos de tracción y compresión en la probeta por acción del resorte
Fuente: MaterialsScience2000, 2014

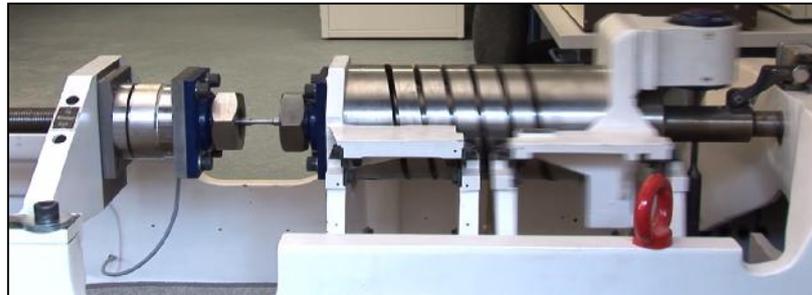


Figura 17. Ensayo realizado en la máquina
Fuente: MaterialsScience2000, 2014

Las partes de esta máquina son:

- Motor
- Tambor transmisor de movimiento
- Masa
- Resorte
- Guías
- Celda de carga

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECATRÓNICO

Los dispositivos, aparatos y equipos que deban ser implementados en este proyecto serán adquiridos del mercado, dimensionando correctamente sus características para optimizar el costo final. En resumen los dispositivos eléctricos y electrónicos que se comprarán son:

- Motor trifásico de inducción
- Pantalla táctil HMI
- Variador de frecuencia
- PLC
- Fuente de poder
- Sensor de distancia
- Celda de carga
- Encoder
- Pulsador de emergencia
- Indicadores eléctricos o luces piloto
- Borneras
- Protecciones eléctricas

Los componentes mecánicos que se construirán son:

- Caja de control
- Soporte para caja de control
- Soporte para motor
- Acoplamiento sensor de distancia
- Acoplamiento celda de carga
- Acoplamiento encoder

Las características y especificaciones técnicas de todos los elementos que se mencionen en este capítulo serán estimadas y dimensionadas de acuerdo al diseño que se plantee, mismas que se tomarán de catálogos en línea; ciertas características como por ejemplo las dimensiones de algunos dispositivos se tomaron midiéndolas de otros que han sido instalados en otros proyectos.

Para verificar las especificaciones técnicas reales de los dispositivos y componentes que se implementaron y construyeron en este proyecto de titulación, dirigirse al Capítulo 4.

3.1. Estado actual de la máquina

La máquina de ensayos de fatiga del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE fue entregada en el año 2004 en total operatividad tanto en conjunto como en sus partes individuales como proyecto de grado titulado: “Diseño y Construcción de una Máquina de Ensayo de Metales Sometidos a Fatiga por Flexión Rotativa con Capacidad de 30 kgf-m para el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la FIM-E” de los autores (Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004).

Los elementos de esta máquina que son de interés para el presente proyecto de titulación son:

- Motor monofásico de inducción
- Contador de revoluciones
- Embrague mecánico

Tras 12 años de funcionamiento la máquina presenta varios elementos averiados, en desuso y en general con una desactualización de carácter tecnológico como por ejemplo: no poseer ningún tipo de control sobre sus componentes, ni monitoreo de las variables que intervienen en el proceso, el contador de revoluciones ya no se encuentra instalado así que la determinación del número de revoluciones que se producen en el ensayo se hace de forma poco ortodoxa, a través de un cronómetro y en conocimiento de la velocidad nominal del motor que es de 1725 RPM (figura 18) se calcula el número de revoluciones que gira el motor.



Figura 18. Especificaciones técnicas motor SINGER

La máquina cuenta con un embrague manual que mediante su acción transmite el movimiento del motor hacia los ejes donde se encuentran los mandriles que sostienen la probeta durante el ensayo, este embrague debe estar accionado durante todo el ensayo; actualmente el embrague no tiene la capacidad de mantenerse accionado por sí mismo, por ello se ha ubicado un tornillo a manera de sostén para mantener el embrague conectado como se indica en la figura 19.



Figura 19. Sujeción del embrague

Los ensayos que se realizan en la máquina se efectúan a una única velocidad que se supone es de 1725 RPM, velocidad nominal del motor mostrada en su placa (figura 18) y no hay posibilidad de realizar un ensayo a una velocidad diferente.

Una vez que la probeta se rompe y el ensayo concluye, el equipo no se detiene, es decir el motor sigue funcionando a la velocidad nominal, y para apagarlo se debe desenergizar la máquina por medio del interruptor principal (ver figura 20).



Figura 20. Interruptor principal de la máquina

La máquina cuenta apenas con una herramienta de seguridad industrial que es la cubierta plástica (ver figura 21) la cual valga la redundancia, recubre la probeta y el eje al momento de realizar el ensayo, no posee un paro de emergencia por lo que la única opción para detener el sistema en caso de ocurrir algún problema es a través del interruptor principal mostrado en la figura 20.



Figura 21. Cubierta plástica de protección

3.1.1. Funcionamiento de la máquina

La máquina fue construida según el diseño R. R. Moore cuya breve explicación está dada en la sección 2.1.2, cabe recalcar que estas características de diseño se mantendrán intactas una vez finalizado este proyecto de titulación.

El análisis estático de fuerzas presentes en el sistema se detalla a continuación:

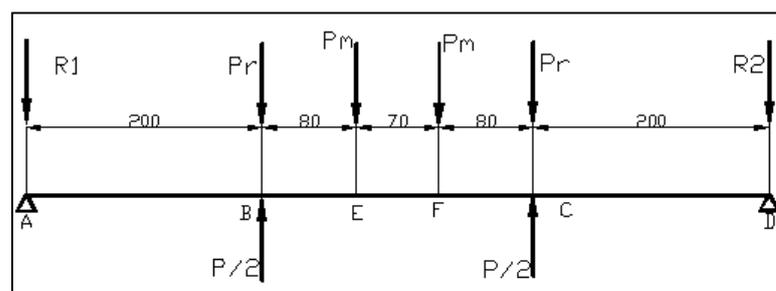


Figura 22. Disposición de fuerzas de la máquina de ensayos de fatiga

Fuente: Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004

Donde:

- A y D: Chumaceras soporte
- B y C: Chumaceras pivote
- E y F: Mandriles que sostienen la probeta
- P_r : Peso de chumacera pivote.
- P_m : Peso de mandril.
- R_1 y R_2 : Reacciones en las chumaceras soporte.
- $P/2$: Cargas dadas por el pistón hidráulico (hacia arriba) o por las pesas (hacia abajo)

La ubicación de estos puntos en la máquina se aprecia en la figura 24. Las dos fuerzas generadas por el peso de las chumaceras pivote y las dos fuerzas del peso de los mandriles serán despreciadas por lo que la disposición de fuerzas del sistema se simplifica a la siguiente:

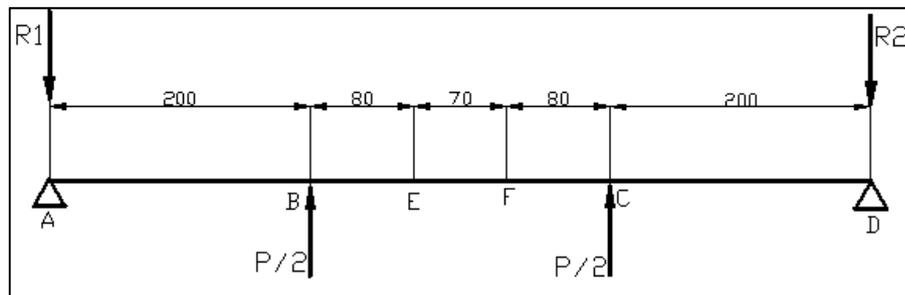


Figura 23. Disposición de fuerzas simplificada de la máquina de ensayos de fatiga

Fuente: Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004

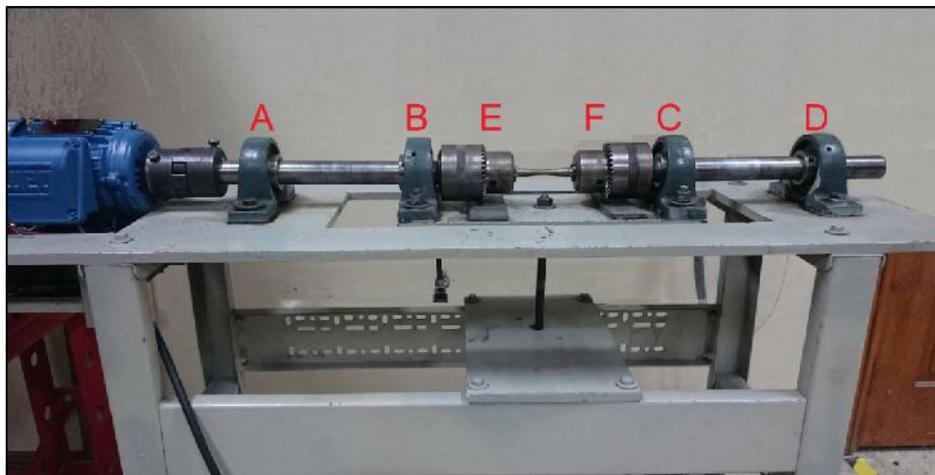


Figura 24. Localización de los puntos A, B, C, D, E y F en la máquina

Dada esta distribución de fuerzas, la probeta de ensayo en reposo experimenta una fuerza cortante (figura 25) y un momento flector (figura 26), ambos constantes. El momento flector produce un esfuerzo flector en la probeta que varía de acuerdo a su localización respecto al eje longitudinal.

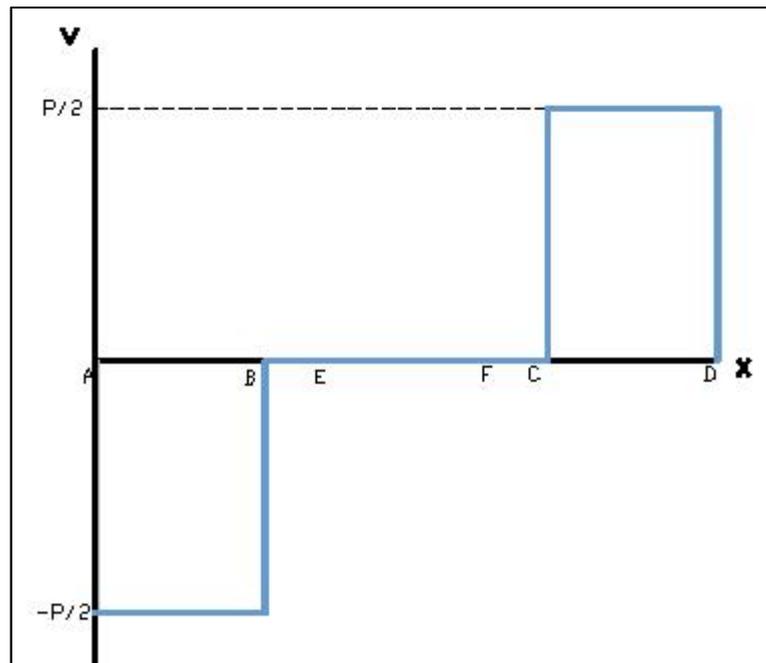


Figura 25. Diagrama de fuerza cortante real del sistema
Fuente: Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004

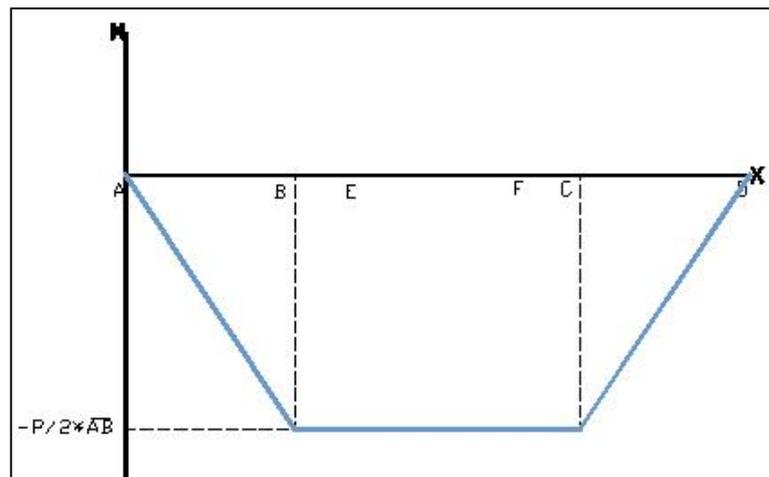


Figura 26. Diagrama de momento flector real del sistema
Fuente: Narváez Mejía & Terán Rosero, 2004

Debido a la naturaleza rotatoria de la máquina, la probeta gira respecto a su eje longitudinal, en consecuencia el esfuerzo flector que se

genera en la probeta analizado en un punto del perímetro de su sección transversal, es de tipo variable o fluctuante y adopta un comportamiento sinusoidal (figura 27).

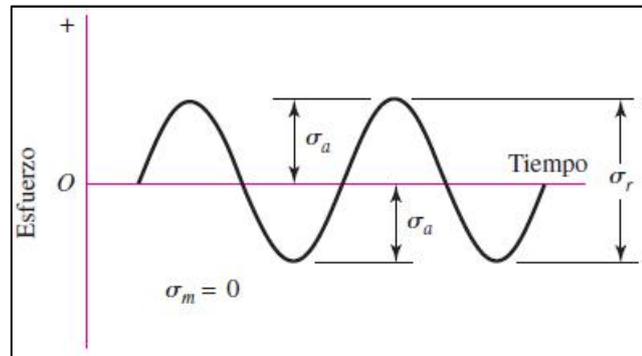


Figura 27. Esfuerzo flector sinusoidal

Fuente: Budynas & Nisbett, 2012

Donde: σ_m : Esfuerzo medio
 σ_a : Amplitud
 σ_r : Intervalo de esfuerzo

La ecuación del esfuerzo flector es:

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Donde: σ : Esfuerzo flector
 M : Momento flector
 y : Distancia de la línea neutra al punto de análisis
 I : Momento de inercia de la sección transversal

La línea neutra está situada horizontalmente sobre la sección transversal de la probeta y es perpendicular al eje longitudinal de la misma, para comprender mejor dirigirse a la figura 28.

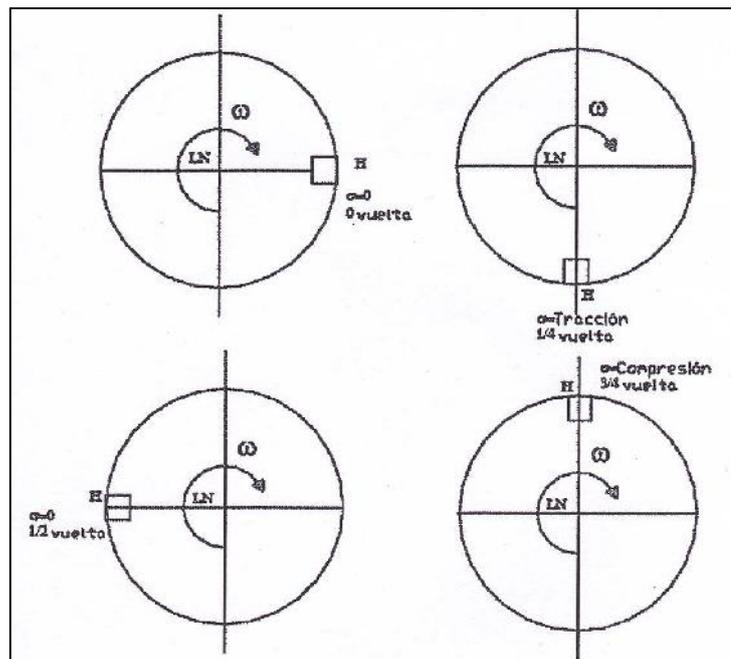


Figura 28. Ubicación del punto H en la probeta de ensayo
 Fuente: Pérez, Prácticas a realizar, Mecánica de Materiales II, 2015

Donde: H : Punto de análisis
 LN : Línea neutra
 ω : Velocidad angular

Por lo tanto si se sitúa el punto de análisis en el punto H de la sección transversal de la probeta (figura 28) y se la hace rotar, el esfuerzo flector en la probeta describe la siguiente curva:

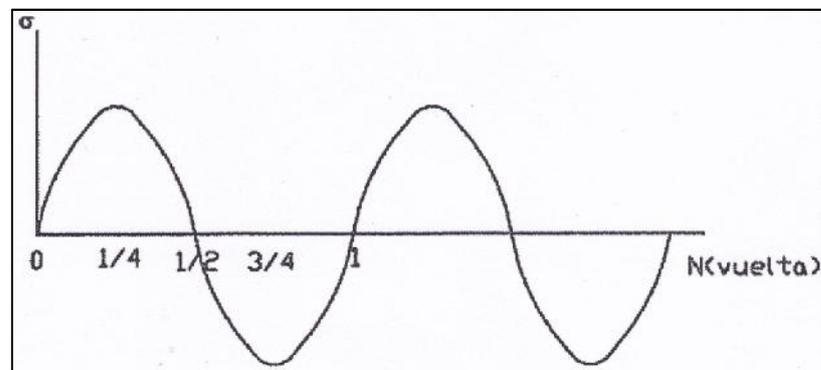


Figura 29. Curva esfuerzo flector vs tiempo
 Fuente: Pérez, Prácticas a realizar, Mecánica de Materiales II, 2015

Esta fluctuación del esfuerzo flector producirá fatiga en la probeta y hará que ésta se rompa.

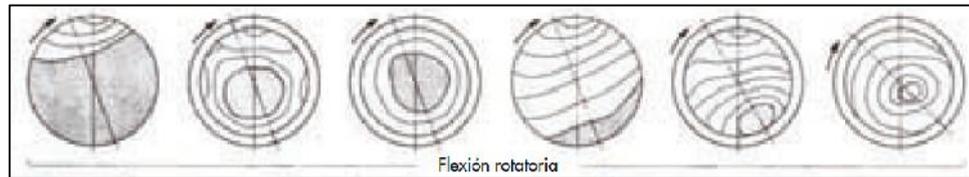


Figura 30. Superficies de fractura por fatiga de flexión rotativa

Fuente: Budynas & Nisbett, 2012

En fatiga se habla de un número de ciclos de esfuerzos o tensiones que el material soporta antes de romperse, específicamente para este caso el número de ciclos se traduce en el número de vueltas que gira la probeta. La figura 28 describe un ciclo del ensayo de fatiga.

Como se mencionó previamente la fatiga es un fenómeno complejo que la ciencia aún no termina de explicarla, por eso los análisis de fatiga se hacen a través de ensayos que han dado como resultado el diagrama de Wöhler o diagrama S-N (Resistencia-Vida por sus siglas en inglés).

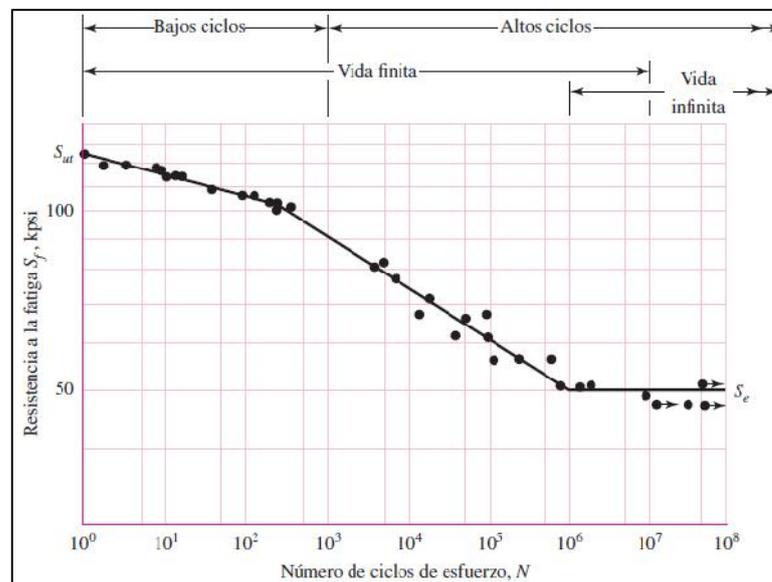


Figura 31. Diagrama S-N para acero UNS G41300 sometido a fatiga axial completamente invertido

Fuente: Budynas & Nisbett, 2012

3.1.2. Propuestas para la realización del proyecto

3.1.2.1. Alternativa número 1

La primera alternativa describe la implementación de una tarjeta Arduino Mega, una pantalla táctil HMI compatible con Arduino, una etapa de potencia y un motor DC. Las características de este potencial proyecto se detallan a continuación:

- **Motor:** Corriente continua, potencia: 200 W, velocidad nominal: 1800 RPM.
- **Acople de motor a eje de la máquina:** A través de matrimonio.
- **Etapa de potencia:** Transistores y drivers compatibles con Arduino dimensionados según la corriente nominal del motor.
- **Interfaz humano máquina:** Pantalla táctil HMI de dimensiones 128x64 milímetros diseñada especialmente para Arduino.
- **Controlador:** Tarjeta Arduino Mega y pantalla táctil HMI enlazados con comunicación serial.
- **Comunicación:** En consecuencia de la flexibilidad que presentan los dispositivos de la plataforma Arduino, la comunicación serial entre la pantalla HMI y el Arduino se realizará directamente a través de la conexión sugerida en la hoja técnica de la pantalla HMI por lo que no se requerirá de circuitos o convertidores adicionales como el caso típico del integrado MAX232. De igual forma el protocolo de comunicación será implementado con la incorporación de librerías preprogramadas en el software del Arduino.

El arranque del motor será accionado por el operador mediante la pantalla HMI, esta pantalla notificará al Arduino y éste ejecutará la operación de arranque; para el funcionamiento del motor es necesario implementar la etapa de potencia. De igual forma el operador regulará la velocidad del motor a través de la pantalla HMI que enviará esta información al Arduino para llevar a cabo el control de velocidad.

La adquisición de datos de las variables que intervienen en el proceso se efectuará mediante sensores que enviarán tal información al Arduino a fin de mostrarlas de forma legible al operador en la pantalla HMI, para ello se configurará los puertos de entrada del Arduino que receptorán información de carácter digital y analógico; se incorporarán librerías preprogramadas en el software del Arduino para lograr una óptima ejecución de las tareas del controlador.

3.1.2.2. Alternativa número 2

La segunda alternativa describe la implementación de un PLC con entrada y salida analógica, una pantalla táctil HMI compatible con PLC y un variador de frecuencia monofásico, las características de estos dispositivos y un resumen de su funcionamiento se detallan a continuación:

- **Motor:** Monofásico de corriente alterna, potencia: 200 W, velocidad nominal: 1725 RPM. Este motor es el que se encuentra actualmente en la máquina.
- **Acople de motor a eje de la máquina:** A través de matrimonio.
- **Interfaz humano máquina:** Pantalla táctil HMI de 4.3 pulgadas diseñada para entornos industriales.
- **Variador de frecuencia:** Un variador de frecuencia es un dispositivo que permite la variación de velocidad en un motor de corriente alterna, para este caso se empleará uno para motores monofásicos. Comercialmente hablando estos dispositivos son producidos en mayor medida para línea blanca.
- **Controlador:** PLC con entrada y salida analógica enlazado mediante comunicación serial a una pantalla táctil HMI.
- **Comunicación:** La comunicación serial entre el PLC y la pantalla HMI se realizará mediante cable Ethernet.

El arranque del motor será accionado por el operador mediante la pantalla HMI que notificará al PLC y éste ejecutará la operación de arranque

por medio del variador de frecuencia. De igual forma el operador regulará la velocidad del motor en la pantalla HMI que enviará esta información al PLC y emitirá una señal analógica al variador de frecuencia para efectuar la variación de velocidad.

La adquisición de datos de las variables que intervienen en el proceso se efectuará mediante sensores que enviarán su respuesta en forma de señales analógicas y digitales al PLC a fin de mostrarlas de forma legible al operador en la pantalla HMI.

3.1.2.3. Alternativa número 3

Esta alternativa describe la implementación de un PLC con entrada analógica, una pantalla táctil HMI compatible con PLC y un variador de frecuencia trifásico, las características de estos dispositivos junto a un resumen de su funcionamiento se detallan a continuación:

- **Motor:** Trifásico de corriente alterna, potencia: 0.5 HP, velocidad nominal: 1680 RPM.
- **Acople de motor a eje de la máquina:** A través de matrimonio.
- **Interfaz humano máquina:** Pantalla táctil HMI de 4.3 pulgadas diseñada para entornos industriales.
- **Variador de frecuencia:** Este dispositivo electrónico permite la variación de velocidad en un motor de corriente alterna, para este caso se empleará uno para motores trifásicos. Estos variadores son ampliamente utilizados en el campo de la automatización industrial.
- **Controlador:** PLC con entrada analógica, pantalla HMI y variador de frecuencia. Estos tres dispositivos configurados en forma de una red industrial, constituirán el controlador.
- **Comunicación:** La comunicación entre el PLC y la pantalla HMI se realizará a través de Ethernet, la comunicación entre el variador de frecuencia y la pantalla HMI se realizará mediante cable RS-485 empleando el protocolo Modbus RTU, no existirá comunicación directa entre el PLC y el variador de frecuencia sino que se ésta se dará

mediante un vínculo que será la pantalla HMI. En consecuencia la red industrial formada tendrá a la pantalla HMI como maestro y al PLC y el variador de frecuencia como esclavos.

El arranque del motor será accionado por el operador mediante la pantalla HMI que notificará al variador de frecuencia, inmediatamente después éste ejecutará la función de arranque del motor trifásico. De igual forma el operador regulará la velocidad del motor en la pantalla HMI que enviará esta información al variador de frecuencia y procederá con el control de velocidad.

La adquisición de datos de las variables del proceso se efectuará mediante sensores que enviarán su respuesta en forma de señales analógicas y digitales al PLC a fin de mostrarlas de forma legible al operador en la pantalla HMI.

3.1.2.4. Matriz de selección

Tabla 1.

Matriz de selección

Parámetro	Alternativa 1	Factor (%)	Calificación /10	Sub total	Alternativa 2	Factor (%)	Calificación /10	Sub total	Alternativa 3	Factor (%)	Calificación /10	Sub total
Confiabilidad de funcionamiento	MEDIANO Mediano nivel de robustez Fácil filtración de ruido eléctrico	20	6	1.2	MUY ALTO Óptimo nivel de robustez Dispositivos especializados para entornos industriales	20	10	2	MUY ALTO Óptimo nivel de robustez Dispositivos especializados para entornos industriales	20	10	2
Vida útil	MEDIANO Mediano nivel de robustez Protección eléctrica limitada	20	6	1.2	MUY ALTO Óptimo nivel de robustez Protección eléctrica garantizada	20	10	2	MUY ALTO Óptimo nivel de robustez Protección eléctrica garantizada	20	10	2
Costos Procesador central	MUY BAJO Tarjeta Arduino relativamente barata para	8	10	0.8	MUY ALTO PLC muy costoso debido a entradas y	8	2	0.16	ALTO PLC de costo moderado debido a entradas	5	4	0.32

este proyecto					salidas analógicas				analógicas			
HMI	MUY BAJO Pantalla HMI para Arduino relativamente barata para este proyecto	4	10	0.4	MEDIANO Pantalla HMI de costo moderado por ser para entornos industriales	4	6	0.24	MEDIANO Pantalla HMI de costo moderado por ser para entornos industriales	4	6	0.24
Motor	MUY ALTO Los motores DC son para poca potencia y tienen un alto costo	4	2	0.08	NINGUNO Es el motor que se encuentra actualmente en la máquina	4	10	0.4	MEDIANO Los motores trifásicos son para alta potencia y tienen amplia accesibilidad en el mercado, por ello su costo moderado	4	6	0.24
Control Motor	MUY BAJO Los motores DC al ser fáciles de controlar, no requieren de dispositivos	4	10	0.4	ALTO Los motores AC al ser difíciles de controlar, requieren de dispositivos	4	4	0.16	ALTO Los motores AC al ser difíciles de controlar, requieren de dispositivos	4	4	0.16

		complejos				complejos Un VDF monofásico es muy poco comercial				complejos Pero un VDF trifásico es ampliamente usado, por ello es muy comercial			
Nivel automatización	de	MUY ALTO Se realizará el control del proceso y monitoreo de sus variables en tiempo real. Se implementará una red industrial.	15	10	1.5	BAJO Se realizará el control del proceso y monitoreo de sus variables en tiempo real.	15	5	0.75	MUY ALTO Se realizará el control del proceso y monitoreo de sus variables en tiempo real. Se implementará una red industrial.	15	10	1.5
Ergonomía		MUY ALTO La operación de máquina será amigable con el usuario	10	10	1	MUY ALTO La operación de máquina será amigable con el usuario	10	10	1	MUY ALTO La operación de máquina será amigable con el usuario	10	10	1
Tamaño circuitería	de	ALTO Se trazarán cables	10	4	0.4	MEDIANO Se trazarán cables	10	6	0.6	BAJO Se trazarán menos cables	10	8	0.8

	debidamente organizados				debidamente organizados				ya que al trabajar a la máxima capacidad de automatización, el control del proceso se hará en su mayoría por la programación del controlador			
	Además se tendrá que fabricar tarjetas electrónicas											
Mantenimiento	MEDIANO PLAZO	5	6	0.3	LARGO PLAZO	5	10	0.5	LARGO PLAZO	5	10	0.5
TOTAL		100%		7.28		100%		7.81		100%		8.76
Propuesta elegida:	Alternativa número 3											

3.2. Diseño de los componentes mecánicos

Se estima implementar los siguientes componentes mecánicos:

- Caja de control
- Soporte para caja de control
- Soporte para motor
- Acondicionamiento mecánico para sensor de distancia
- Acondicionamiento mecánico para celda de carga
- Acoplamiento entre eje del motor y eje de encoder

3.2.1. Caja de control

En la caja de control se posicionarán gran parte de los dispositivos que automatizarán la máquina de Ensayos de Fatiga, habrá elementos que necesiten estar fuera de la caja como es el caso de los sensores que deberán estar instalados y acoplados en la misma máquina pero siempre se mantendrán enlazados mediante el cableado a la caja de control, es por esto que la caja debe situarse cerca de la máquina. Los dispositivos que estarán en la caja de control son:

- **Pantalla táctil HMI:** Empotrada en la tapa frontal
- **PLC:** Empotrado dentro de la caja
- **Variador de frecuencia:** Empotrado dentro de la caja
- **Fuente de poder:** Empotrada dentro de la caja
- **Disyuntores:** Empotrados dentro de la caja
- **Borneras:** Empotradas dentro de la caja
- **Canaletas:** Empotradas dentro de la caja
- **Pulsador de emergencia:** Empotrado en la tapa frontal
- **2 indicadores eléctricos:** Empotrados en la tapa frontal

Existe en el mercado gabinetes para este propósito (ver tabla 2), los cuales tienen las respectivas consideraciones y seguridades para albergar dispositivos eléctricos y electrónicos como el hecho de estar cubiertos con pintura electrostática y anti-inflamable. Lo que se necesita conocer entonces es el tamaño que debe tener este gabinete para albergar los equipos, por lo

tanto se debe conocer las dimensiones de los dispositivos que se ubicarán dentro de la caja de control.

Tabla 2.
Dimensiones gabinetes comerciales

Imagen	Referencia	Descripción					
		Alto	Ancho	Profund.	Espesor Tablero	Espesor Puerta	Espesor Doble fondo
		Medidas en (mm)					
	BJS1-2020/100	200	200	100	1,20	1,20	1,20
	BJS1-2020/150	200	200	150	1,20	1,20	1,20
	BJS1-3020/150	300	200	150	1,20	1,20	1,20
	BJS1-3025/150	300	250	150	1,20	1,20	1,20
	BJS1-3025/250	300	250	250	1,20	1,20	1,20
	BJS1-3030/150	300	300	150	1,20	1,20	1,20
	BJS1-4030/200	400	300	200	1,20	1,20	1,20
	BJS1-4030/300	400	300	300	1,20	1,20	1,20
	BJS1-4040/200	400	400	200	1,20	1,20	1,20
	BJS1-5040/200	500	400	200	1,20	1,20	1,20
	BJS1-6040/300	600	400	300	1,20	1,20	1,20
	BJS1-6050/200	500	500	200	1,20	1,20	1,20
	BJS1-6040/200	600	400	200	1,20	1,20	1,20
	BJS1-6050/200	600	500	200	1,20	1,20	1,20
	BJS1-6060/250	600	600	250	1,20	1,20	1,20
	BJS1-7050/250	700	500	250	1,20	1,50	1,20
	BJS1-8060/250	800	600	250	1,20	1,50	1,20
BJS1-8060/300	800	600	300	1,20	1,50	1,20	
BJS1-8080/300	800	800	300	1,20	1,50	1,20	
BJS1-1060/300	1000	600	300	1,50	1,50	2,00	
BJS1-1080/300	1000	800	300	1,50	1,50	2,00	
BJS1-1260/300	1200	600	300	1,50	1,50	2,00	
BJS1-1280/300	1200	800	300	1,50	1,50	2,00	
BJS1-1010/300/2P	1000	1000	300	1,50	1,50	2,00	
BJS1-1210/300/2P	1200	1000	300	1,50	1,50	2,00	

Fuente: Sumelec, Lista de precios 2014, sección Sbox – Tableros metálicos, pág. 113.

De acuerdo a los catálogos que se pueden encontrar en internet, las dimensiones dadas en (ancho x alto x profundidad) de los dispositivos son las siguientes:

Dimensiones de la pantalla táctil HMI: 129 x 103 x 39 mm (tabla 3)

Tabla 3.
Especificaciones técnicas HMI - Dimensiones

Shock	IEC 60068-2-27 compliant 15g peak for 11 ms duration, X, Y, Z directions for 6 times	
Dimensions (W) x (H) x (D) mm	129 x 103 x 39	
Panel Cutout (W) x (H) mm	118.8 x 92.8	
Weight	Approx. 230g	Approx. 264g

Fuente: Delta, DOP-B03 DOPB03S211/B03E211 Instruction Sheet, sección especificaciones.

Dimensiones del variador de frecuencia: 68 x 128 x 115 mm (tabla 4)

- En el variador de frecuencia se debe destinar un espacio adicional para la disipación de calor (ver figura 32)

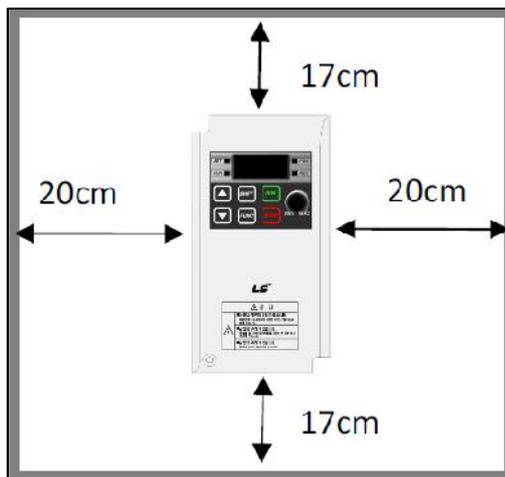
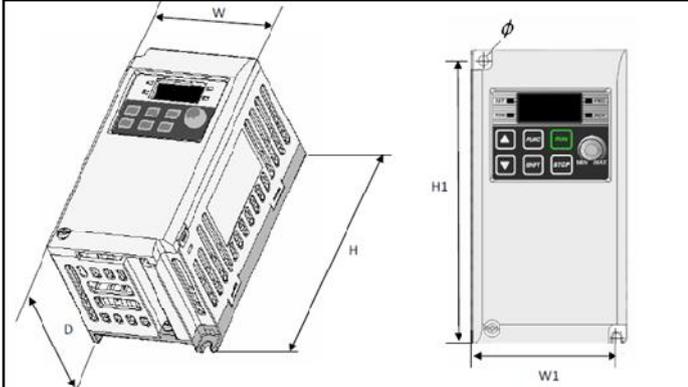


Figura 32. Instalación VDF dentro de panel sin apertura de ventilación

Fuente: LS SV-iE5, Manual de usuario, sección Precauciones de instalación

Tabla 4.
Datos técnicos variador de frecuencia – Dimensiones



Variador	001E5-1	002E5-1	004iE5-1	001E5-2	002E5-2	004iE5-2
W	68	68	68	68	68	68
H	128	128	128	128	128	128
D	85	85	115	85	85	115
H1	124	124	124	124	124	124
W1	64	64	64	64	64	64
φ	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Peso(kg)	0.44	0.40	0.60	0.43	0.45	0.67
Nota	Usar tornillos M4 para fijar el variador en un panel.					

Fuente: LS, Manual de Usuario SV-iE5, capítulo Instalación, sección Dimensiones, Modelo de variador 004iE5-2

Dimensiones del PLC: 90 x 100 x 75 mm (tabla 5)

Tabla 5.
Especificaciones técnicas PLC - Dimensiones

Datos técnicos			
Modelo	CPU 1211C AC/DC/relé	CPU 1211C DC/DC/relé	CPU 1211C DC/DC/DC
Referencia (MLFB)	6ES7 211-1BD30-0XB0	6ES7 211-1HD30-0XB0	6ES7 211-1AD30-0XB0
General			
Dimensiones A x A x P (mm)	90 x 100 x 75		
Peso	420 gramos	380 gramos	370 gramos
Disipación de potencia	10 W	8 W	
Intensidad disponible (bus CM)	750 mA máx. (5 V DC)		
Intensidad disponible (24 V DC)	300 mA máx. (alimentación de sensores)		
Consumo de corriente de las entradas digitales (24 V DC)	4 mA/entrada utilizada		

Fuente: Siemens, Simatic S7 Controlador programable S7-1200 Manual de sistema, sección datos técnicos de la CPU 1212C

Dimensiones de la fuente de poder: 32 x 120.6 x 113 mm (tabla 6)

Tabla 6.

Especificaciones técnicas fuente de Poder - Dimensiones

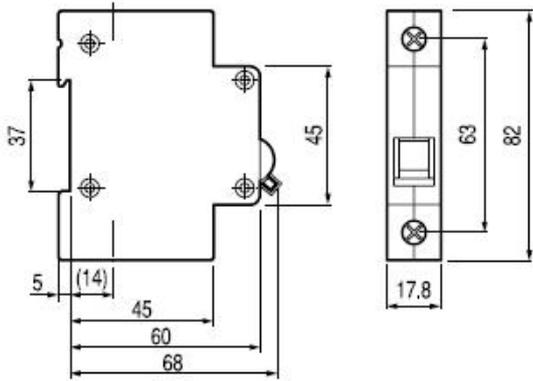
Mechanical	
Case Cover / Chassis	Plastic
Dimensions (L x W x D)	120.6 x 32 x 113 mm
Unit Weight	0.33 kg
Indicator	Green LED (DC OK)
Cooling System	Convection
Terminal	Input 3 Pins (Rated 300V/20A)
	Output 2 Pins (Rated 300V/20A)
Wire	AWG 22-14
Mounting Rail	Standard TS35 DIN Rail in accordance with EN 60715
Noise (1 Meter from power supply)	Sound Pressure Level (SPL) < 40dBA

Fuente: Delta, Technical Datasheet CliQ DIN Rail Power Supply, sección especificaciones mecánicas

Dimensiones de los disyuntores:

- Se tiene un disyuntor de tres polos para el variador de frecuencia cuyas dimensiones son: 53.4 x 82 x 68 mm (tabla 7).
- Se tiene dos disyuntores de dos polos para el PLC y la fuente de poder, las dimensiones de cada uno es: 35.6 x 82 x 68 mm (tabla 7).

Tabla 7.
Especificaciones técnicas disyuntores - Dimensiones

Montaje	Montaje en riel DIN de 35mm
Ancho	17.8mm por polo
Dimensiones	 <p>The drawing shows two views of a miniature thermal magnetic circuit breaker. The front view (left) shows a rectangular component with a total width of 68 mm and a total height of 45 mm. It has a mounting tab on the left that is 37 mm high and 5 mm wide. The distance from the left edge to the center of the mounting holes is 14 mm. The side view (right) shows the component's profile with a total height of 82 mm and a width of 17.8 mm. The distance between the two mounting holes is 63 mm.</p>

Fuente: LS, Mini Interruptores Termomagnéticos e Interruptores diferenciales, sección Interruptores termomagnéticos tipo miniatura, pág. 6

Para determinar las dimensiones de los siguientes dispositivos, se utilizó como referencia otros proyectos.

Dimensiones de las borneras: 6 x 50 x 40 mm (medido)

- Las borneras se colocarán con el objetivo de hacer puentes en la circuitería y facilitar las conexiones, por ejemplo la fuente de poder tiene una sola toma de salida de 24 VDC, al colocar borneras se extiende el número de salidas.

Dimensiones de las canaletas: ancho: 25 mm (medido), profundidad: 25 mm (medido)

- Las canaletas sirven para dirigir el cableado y organizar la circuitería, de acuerdo al tamaño de cable que se utilizará (ver sección 4.2.6.1. Cableado eléctrico).

Dimensiones del pulsador de emergencia: diámetro: 40 mm, profundidad: 80 mm (medido)

Dimensiones de los indicadores eléctricos: diámetro: 29 mm, profundidad: 55 mm (medido)

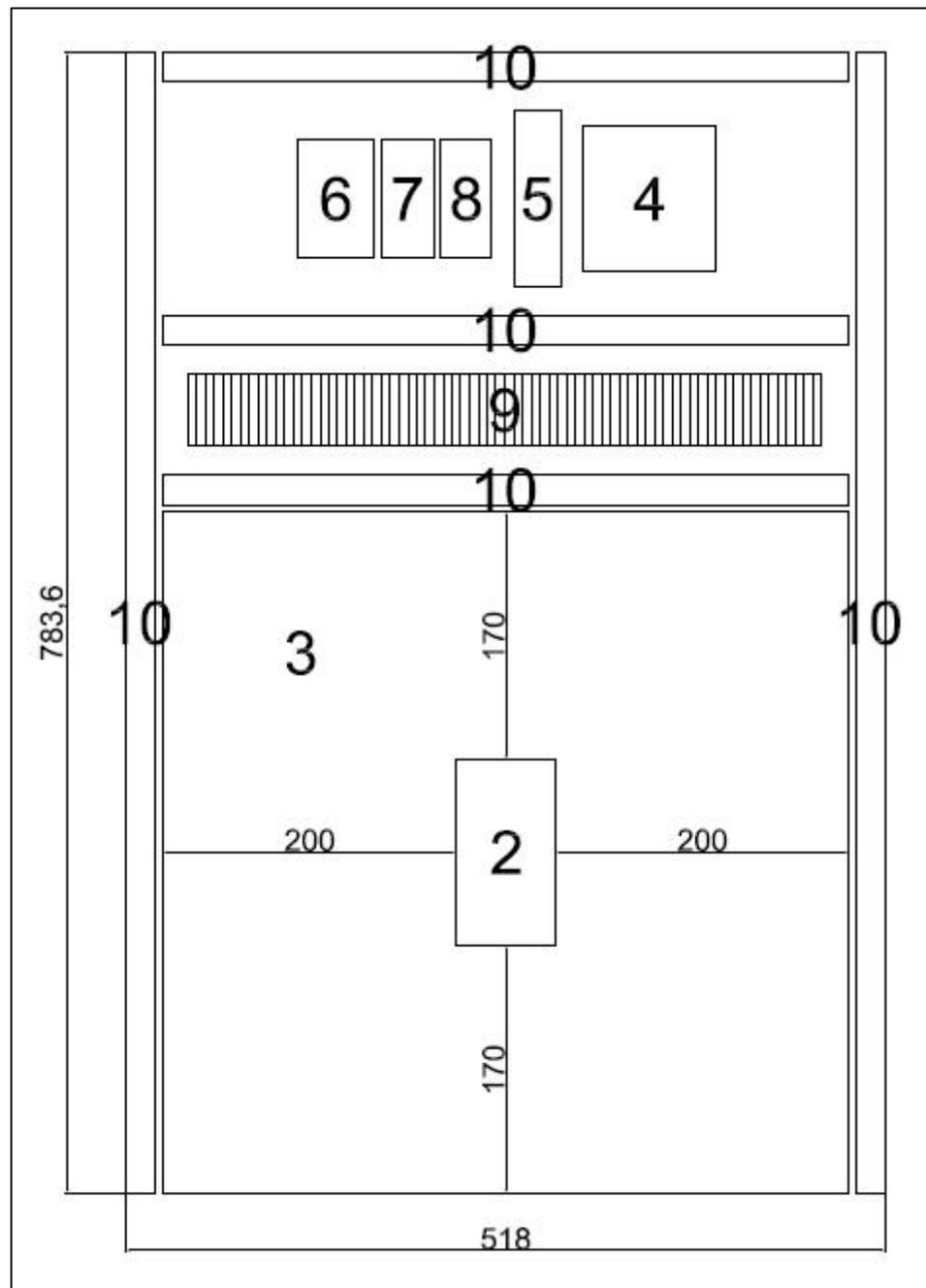
- Se tiene dos indicadores eléctricos o luces piloto, uno en color rojo y otro en color verde.

Disposición de los componentes

Una vez determinadas las dimensiones de los dispositivos, se propone la siguiente disposición de los mismos:

- Donde:
- 1: Pantalla táctil HMI
 - 2: Variador de frecuencia
 - 3: Espacio recomendado para el variador de frecuencia por concepto de disipación de calor
 - 4: PLC
 - 5: Fuente de poder
 - 6: Disyuntor para proteger el variador de frecuencia
 - 7: Disyuntor para proteger el PLC
 - 8: Disyuntor para proteger la fuente de poder
 - 9: Borneras
 - 10: Canaletas
 - 11: Pulsador de emergencia
 - 12: Indicador eléctrico verde
 - 13: Indicador eléctrico rojo

Vista Frontal

**Figura 33.** Vista frontal – dimensiones gabinete)

Vista Lateral

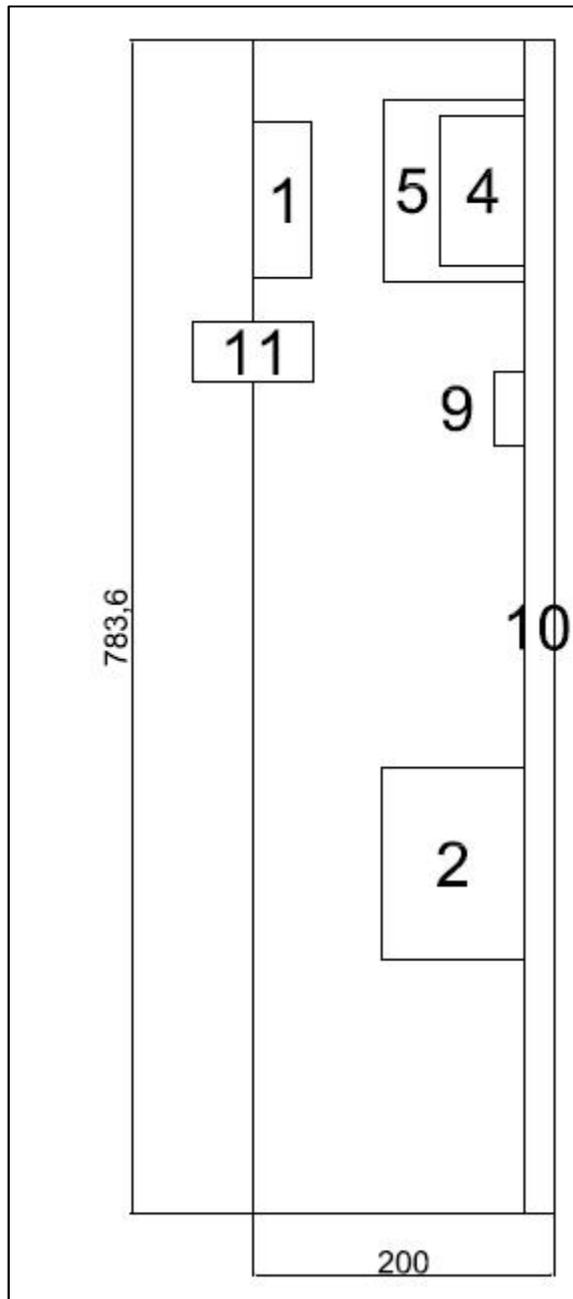


Figura 34. Vista lateral – dimensiones gabinete

Dimensiones del gabinete:

Como se puede observar el gabinete necesario para la caja de control, disponible en el mercado es el de 800 x 600 x 250 mm (ver tabla 2), a pesar de que se requiere 518 mm de ancho y 783.6 mm de alto, se reducirá el espacio que el fabricante del variador de frecuencia recomienda para su

instalación por concepto de disipación de calor (ver figura 35) considerando que el variador de frecuencia permanecerá la mayor parte del tiempo apagado.

Finalmente se dispondrá de la siguiente caja de control:

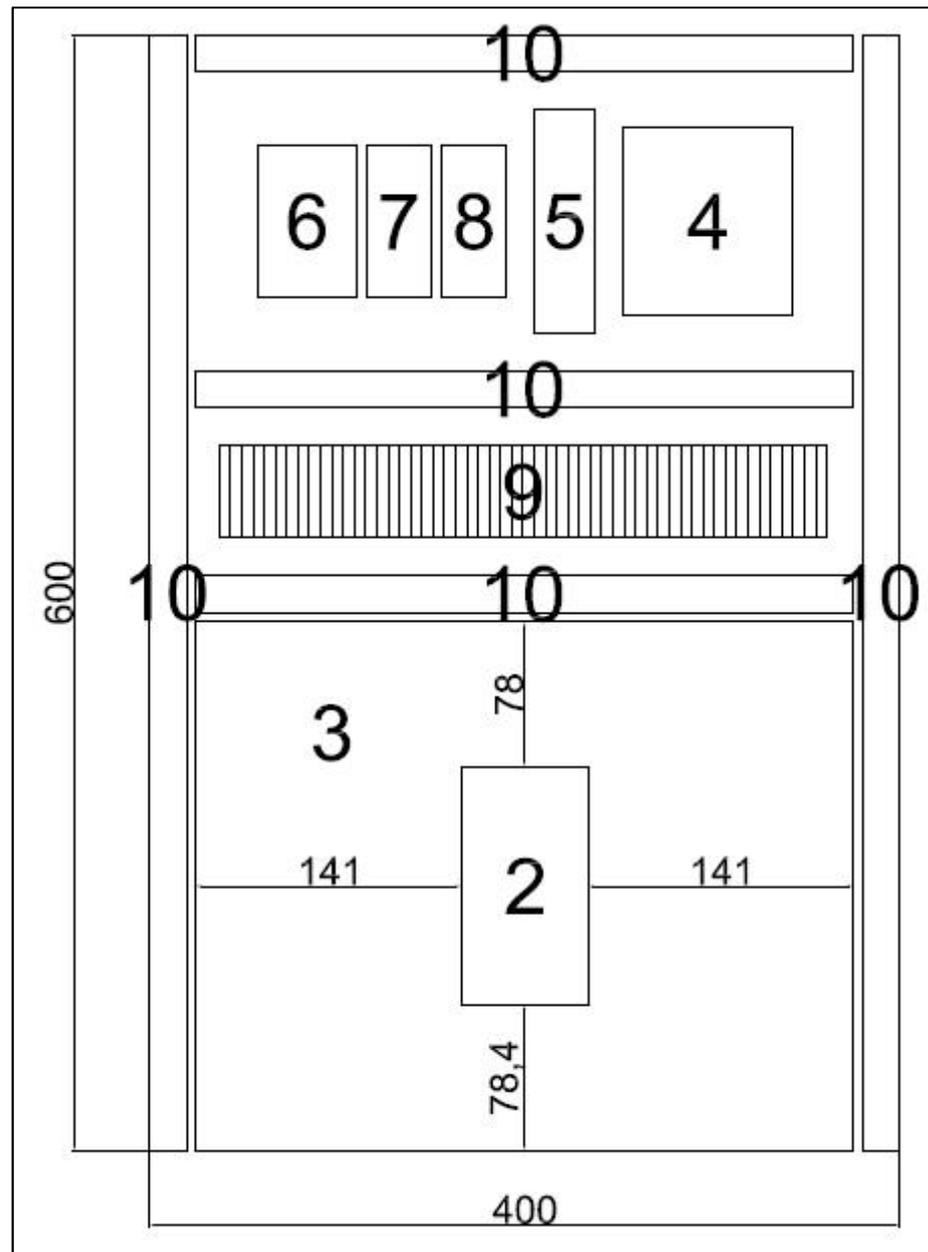


Figura 35. Disposición componentes dentro de gabinete

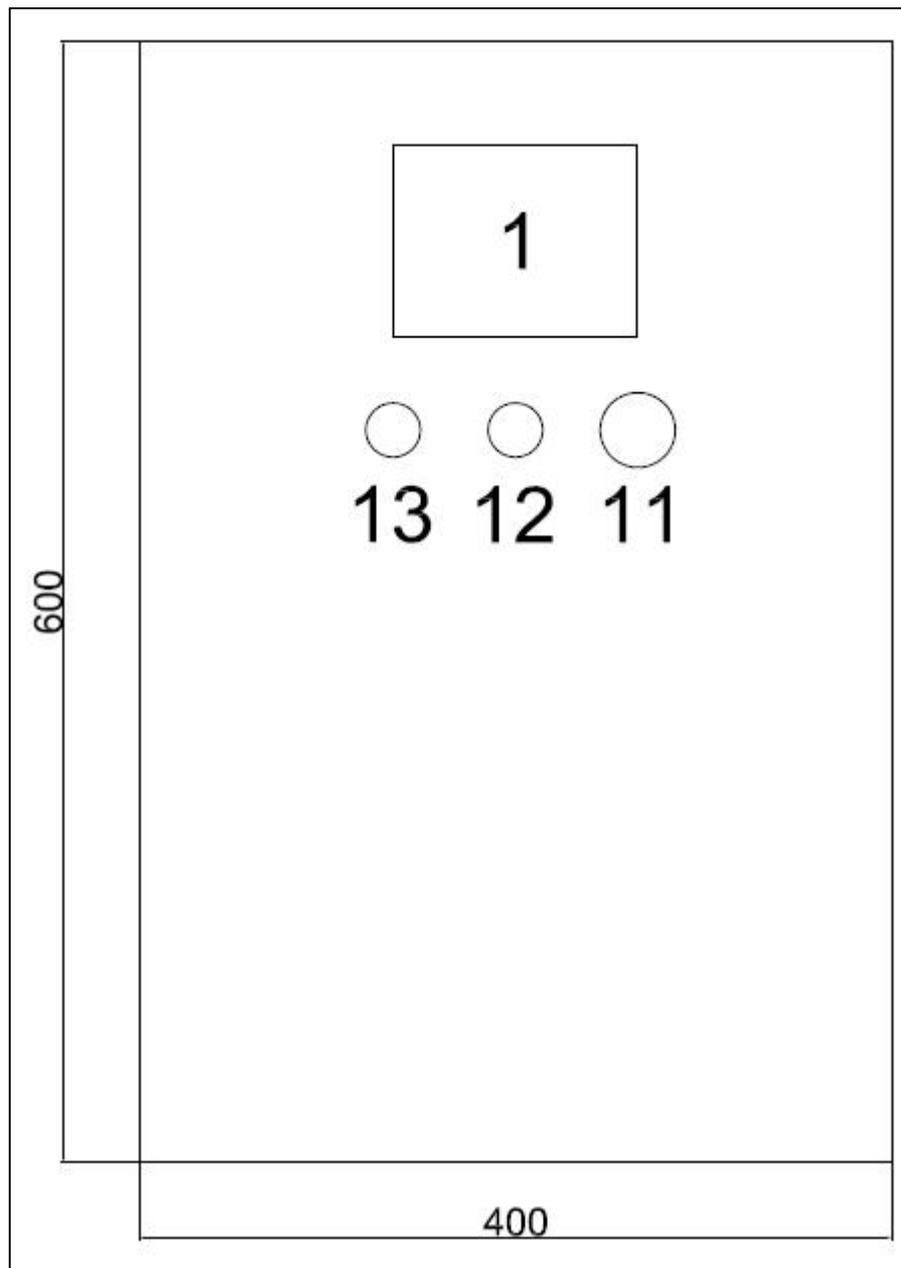


Figura 36. Disposición componentes puerta gabinete

En consecuencia comprará un gabinete de 600 x 400 x 200 mm. Para mayor referencia dirigirse a los planos mecánicos en Anexos.

3.2.2. Soporte para caja de control

Se desea que la pantalla táctil empotrada en la caja de control o gabinete, esté a una altura de 1.60 m para facilidad de operación y que se

sitúe carga de la máquina para reducir el cableado (ver figura 37), así que se propone el siguiente diseño:

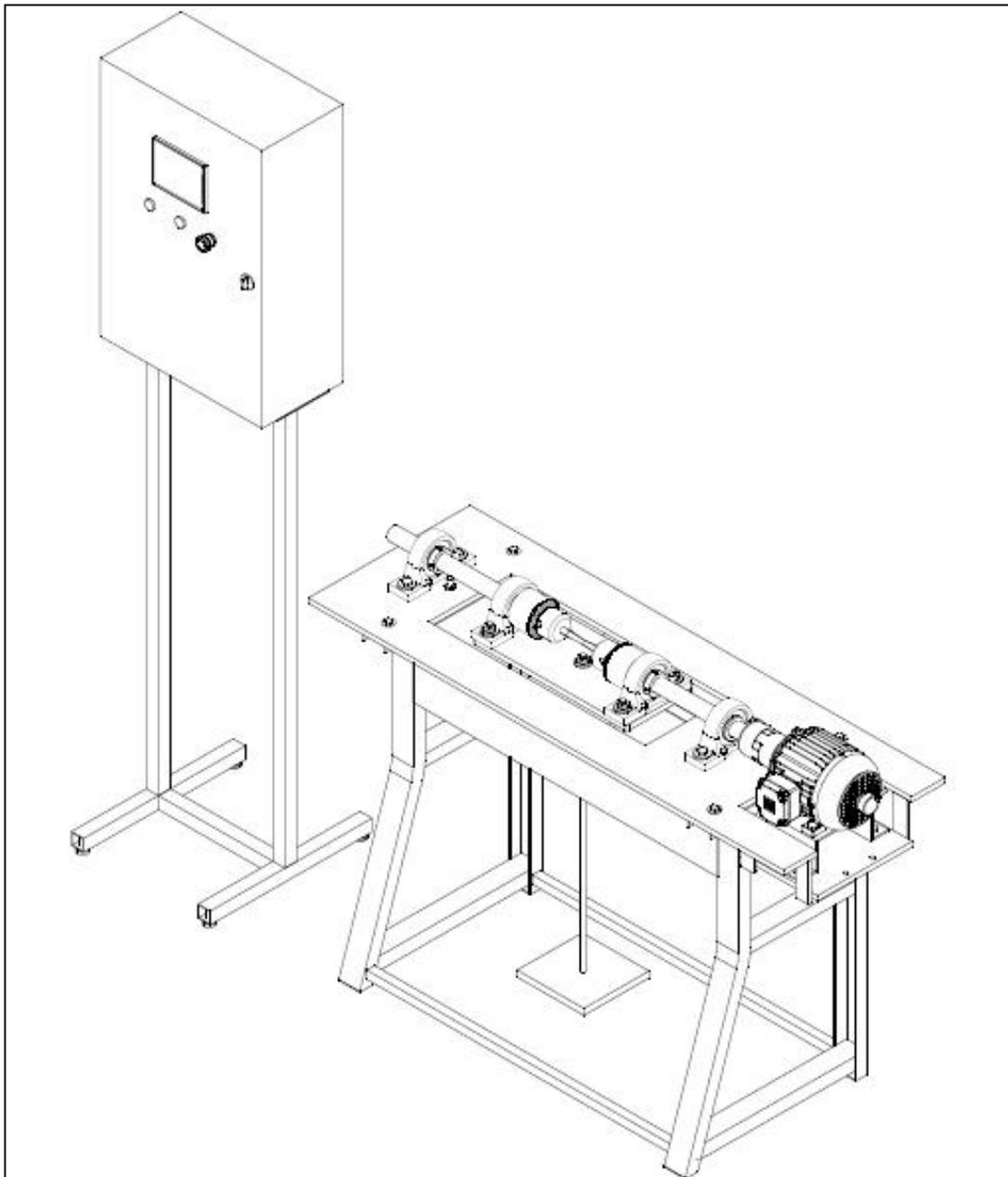


Figura 37. Isometría - Automatización de la Máquina de Ensayos de Fatiga

A continuación se especificarán los siguientes parámetros de diseño:

Dimensiones de la caja de control: 600 X 400 X 200 mm

Para el diseño de la estructura de soporte de la caja de control se tomará en cuenta las dimensiones de la base de la caja (400 X 200 mm), para entender mejor dirigirse a los planos mecánicos en Anexos

Pesos:

- Peso de la caja vacía: 8.27 kg (medido)
- Peso pantalla táctil HMI: 264 g (ver tabla 3)
- Peso del variador de frecuencia: 670 g (ver tabla 4)
- Peso del PLC: 420 g (ver tabla 5)
- Peso de la fuente de poder: 330 g (ver tabla 6)
- Peso disyuntor para variador de frecuencia: 180 g (medido)
- Peso disyuntor para PLC: 120 g (medido)
- Peso disyuntor para fuente de poder: 120 g (medido)
- Peso del pulsador de emergencia: 136 g (medido)
- Peso de los indicadores eléctricos: 150 g (medido)
- Peso de las borneras, canaletas y riel din: 350 g (medido)

Tabla 8.

Detalle del peso de la caja de control

Dispositivo	Peso (kg)
Caja vacía	8.27
Pantalla táctil HMI	0.264
Variador de frecuencia	0.670
PLC	0.420
Fuente de poder	0.330
Disyuntor variador de frecuencia	0.180
Disyuntor PLC	0.120
Disyuntor fuente de poder	0.120
Pulsador de emergencia	0.136
Indicadores eléctricos	0.150
Borneras, canaletas y riel din	0.350
Peso total	11.01

Se realizará la estructura con acero A-36 con la siguiente característica:

Límite de Fluencia: $\sigma_{fl} = 250 \text{ MPa}$

Densidad: $\rho = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Se realizará el diseño a través de la teoría de la energía de distorsión donde:

$$\sigma' = \frac{\sigma_{fl}}{n} \quad \text{Ec. Diseño de fluencia}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad \text{Esfuerzo de Von Mises}$$

Modelado:

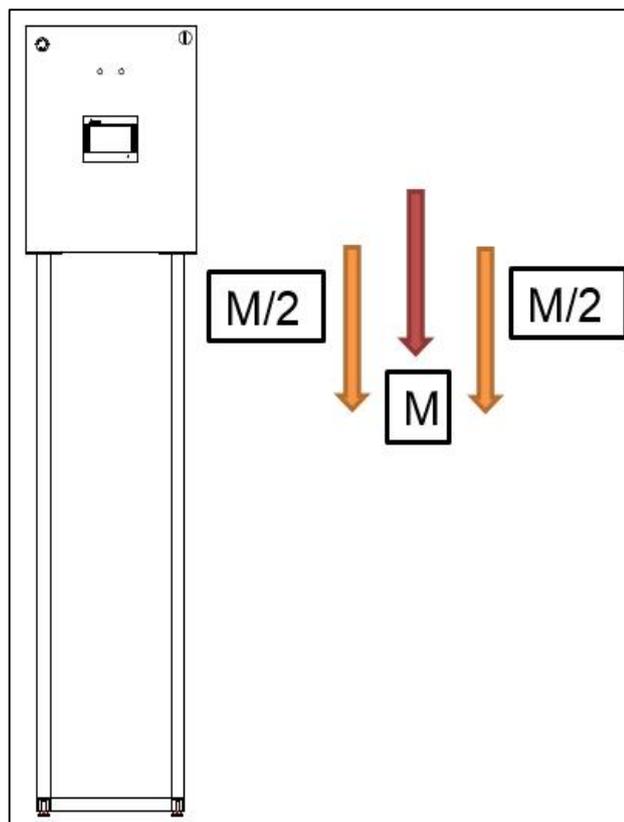


Figura 38. Vista frontal - soporte y gabinete

De acuerdo al diseño propuesto el peso de la caja de control se dividirá a la mitad en cada soporte de la estructura.

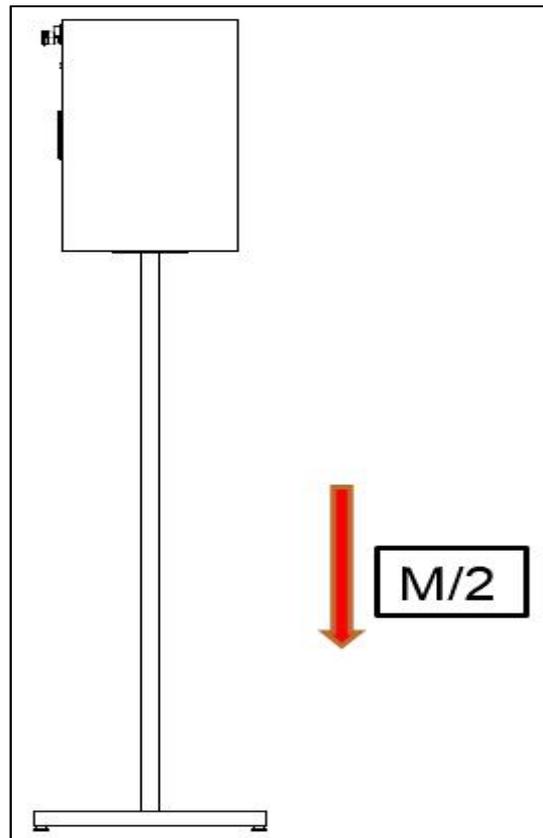


Figura 39. Vista lateral - soporte y gabinete

De la vista lateral se puede observar que el modelo que está acorde con el diseño propuesto de la caja de control es el de una viga simplemente apoyada.

Se debe considerar el peso de las placas que sostendrán a la caja de control. Las placas serán de dimensiones 127x86x1 mm.

$$M_{placa} = \left(\frac{127}{1000} m * \frac{86}{1000} m * \frac{1}{1000} m \right) * 7850 \frac{kg}{m^3} = 0.036 kg$$

Se debe adicionar los pesos tanto de las placas como del tubo cuadrado a la masa total ya calculada previamente.

En primera instancia se colocará un tubo cuadrado de 10x10 mm y 1004.4 mm de longitud.

$$A_1 = \left(\frac{10}{10000} m * \frac{10}{1000} m \right) = 1 \times 10^{-4} m^2$$

$$A_2 - \left(\frac{8}{10000} n * \frac{8}{1000} m \right) = 6.4 \times 10^{-5} m^2$$

$$A_{tubo} = 1 \times 10^{-4} - 6.4 \times 10^{-5} = 3.6 \times 10^{-5} m^2$$

$$M_{tubo} = \left(3.6 \times 10^{-5} m^2 * \frac{1004.4}{1000} m \right) * 7850 \frac{kg}{m^3} = 0.28 kg$$

De acuerdo a la figura 38 el peso que actuará sobre el soporte será:

$$M = \frac{11.01}{2} + 0.086 + 0.28 = 5.871 kg$$

$$W = 5.871 \cdot 9.8 = 57.54 N$$

Cálculo de las reacciones:

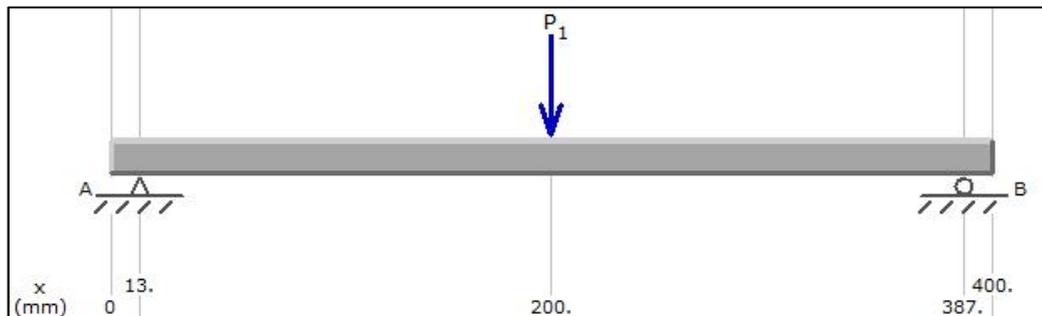


Figura 40. Diagrama de carga

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{AY} + R_{BY} - 57.54 = 0$$

Ec. (1)

Del diagrama de cargas obtenemos la ecuación 1 y del diagrama de momento obtendremos la ecuación 2.

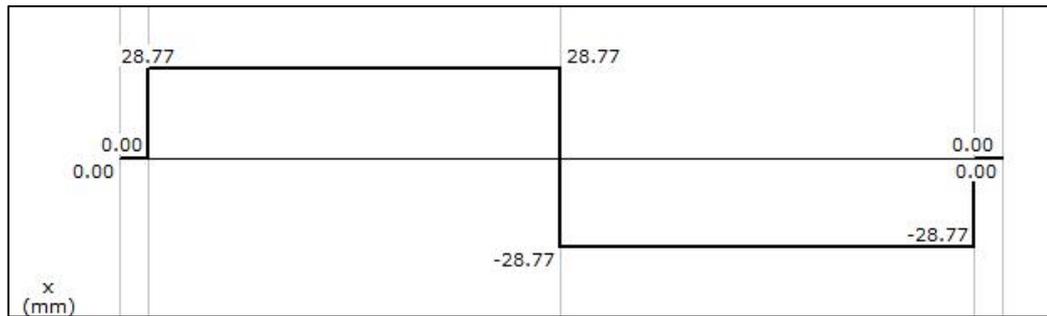


Figura 41. Diagrama esfuerzo cortante

$$\sum M_A = 0$$

$$R_{By} * 0.374 - 57.54 * 0.187 = 0 \quad \text{Ec. (2)}$$

$$R_{By} = 28.77 \text{ N}$$

Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene el valor de la reacción en A

$$R_{Ay} \approx 57.54 - 28.77$$

$$R_{Ay} = 28.77 \text{ N}$$

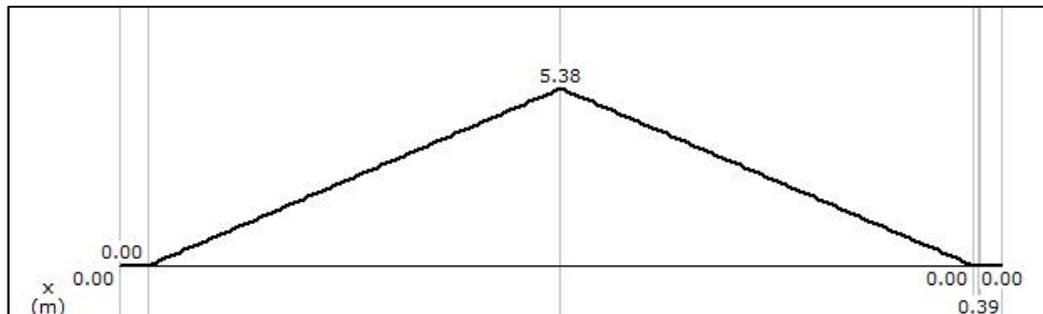


Figura 42. Diagrama momento flector

El valor del momento máximo corresponde al área bajo la curva del diagrama de cortante, es decir:

$$M_{m\acute{a}ximo} = 28.77 * (0.2 - 0.013)$$

$$M_{m\acute{a}ximo} = 5.38 \text{ N} * \text{m}$$

Ahora:

$$\tau_{xy} = \frac{V_{max}}{A}$$

$$\tau_{xy} = \frac{28.77 \text{ N}}{3.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 0.79 \text{ MP}$$

Como se mencionó anteriormente el perfil que se desea implementar es de forma cuadrada

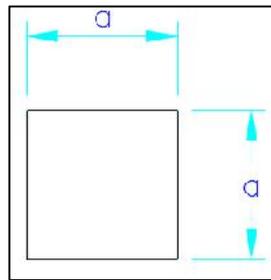


Figura 43. Sección perfil

La inercia correspondiente a una figura cuadrada es:

$$I = \frac{a^4}{12}$$

La inercia de un tubo cuadrado es:

$$I = \frac{1}{12}(0.01)^4 - \frac{1}{12}(0.008)^4 = 16.27 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

El esfuerzo debido a la flexión será:

$$\sigma_x = \frac{M * y}{I}$$

Como el momento máximo se produce en las fibras más alejadas, es decir desde el centro de gravedad hacia la superficie como se puede observar en la siguiente figura:

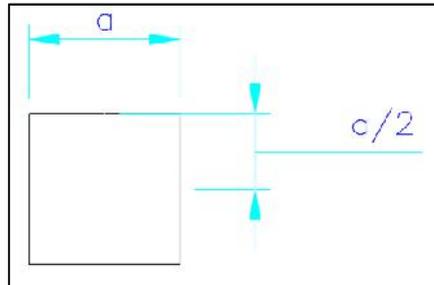


Figura 44. Distancia 'y'

$$\sigma_x = \frac{(5.38) (0.005)}{16.27 \times 10^{-9}} = 1.65 \text{ MF}$$

Aplicando la ecuación de Von Mises el esfuerzo será:

$$\sigma' = \sqrt{(1.65)^2 + 3(0.79)^2} = 2.14 \text{ MF}$$

Para conocer el factor de seguridad de nuestro diseño aplicaremos la ecuación de diseño a la fluencia:

$$n = \frac{\sigma_{jl}}{\sigma'}$$

$$n = \frac{250 \text{ MF}}{2.14 \text{ MF}} = 116.82$$

El factor de seguridad con un perfil cuadrado de 10x1 mm es mayor que 2 por lo que está bien el diseño pero para nuestro el perfil se cambiará por estética a un perfil cuadrado de 30x1 mm dándonos un factor de seguridad $n=44.09$ realizando nuevamente el proceso ya mostrado.

3.2.3. Soporte para motor

Se propone el siguiente diseño para el soporte para el motor:

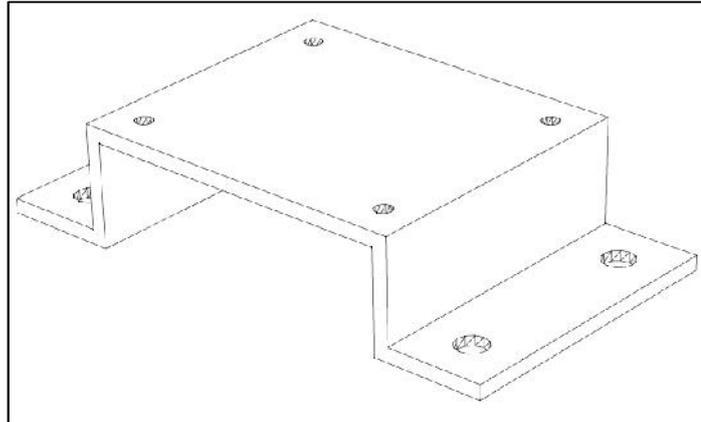


Figura 45. Soporte motor

Debido a que el esfuerzo de Von Mises para el diseño de elementos a fluencia está en función de sus componentes de flexión y cortante, y a su vez estas son dependientes de la inercia de figuras simples como tubos cuadrados, tubos circulares, ejes, etc. No es posible diseñar con cálculos la forma que se propone para la base del motor por lo que se empleará un software de simulación y de esa forma se podrá conocer el esfuerzo de Von Mises y por ende el factor de seguridad, tomando en cuenta que el material a utilizar es acero A-36.

Parámetros para la simulación de la base del motor si este tuviese un arranque directo:

El peso del motor es una carga distribuida por toda el área de la base.

$$\begin{aligned}
 M_{motor} &= 10 \text{ Kg} \\
 T_{nominal} &= 210 \text{ Nm} \\
 T_{arranque} &= 210 \% \\
 e_{base} &= 4 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

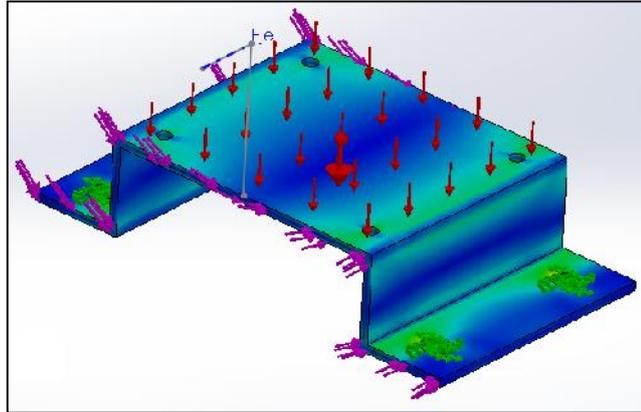


Figura 46. Simulación del esfuerzo en base

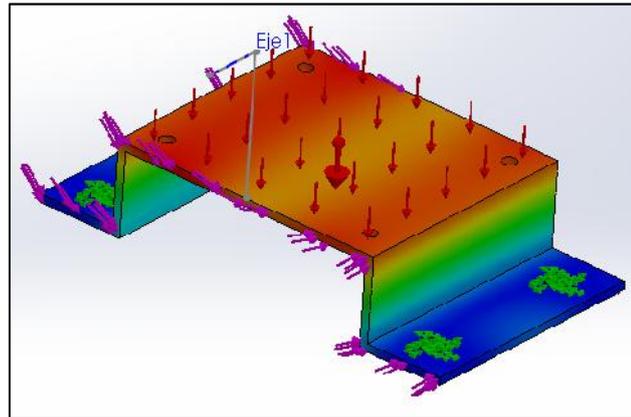


Figura 47. Desplazamiento generado

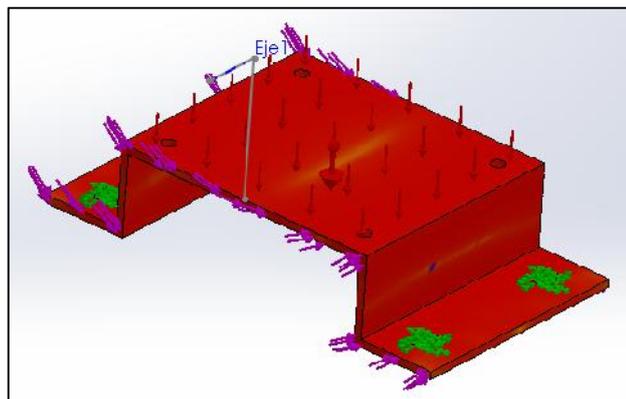


Figura 48. Factor de seguridad

Tabla 9.

Resumen de resultados – arranque directo

Parámetros	Esfuerzo de Von Mises [N/m ²]	Deflexión [mm]	Factor de seguridad
	4865.51	0.004	62

En el presente proyecto se realizará el arranque del motor a través de un variador de frecuencia por lo que se utilizarán los siguientes parámetros:

$$M_{motor} \approx 10 \text{ Kg}$$

$$T_{nominal} \approx 2.10 \text{ Nm}$$

$$e_{base} = 2\text{mm}$$

Tabla 10.

Resumen de resultados – arranque con VDF

Parámetros	Esfuerzo de Von Mises [N/m ²]	Deflexión [mm]	Factor de seguridad
	5197.58	0.016	30.51

A pesar de los resultados obtenidos se realizará la base con una placa de espesor 4 mm de acero A-36.

3.2.4. Acondicionamiento mecánico para sensor de distancia

Para el sensor de distancia se perforará el skid de la máquina y será sujetado a esta con las tuercas propias del sensor, ver figuras 49 y 50.

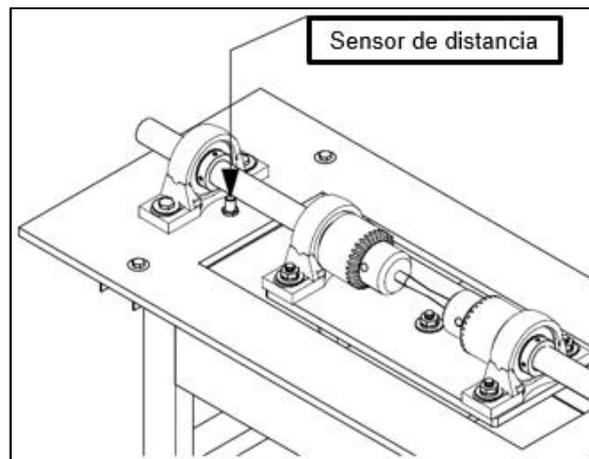


Figura 49. Vista isométrica - sensor de distancia

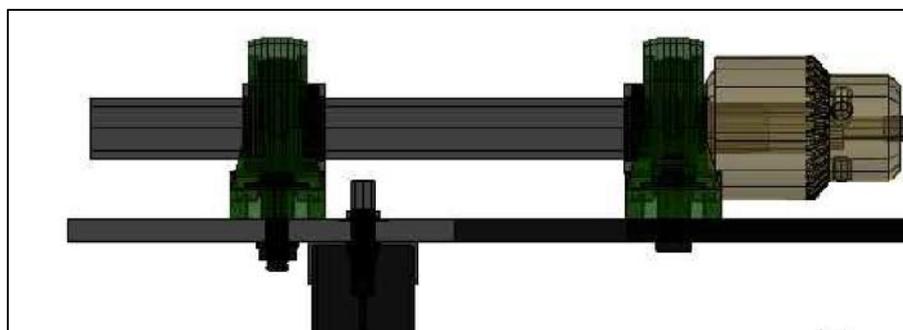


Figura 50. Vista frontal - sensor de distancia

3.2.5. Acondicionamiento mecánico para celda de carga

La forma en la que se acoplará la celda de carga a la máquina será a través de perno, arandela y tuerca de dimensiones 1/2" x 2" para ajustar la misma a la placa superior, para la parte inferior se roscará el eje del porta-pesas y se ajustará a la celda con una tuerca como lo muestra la figura 51.

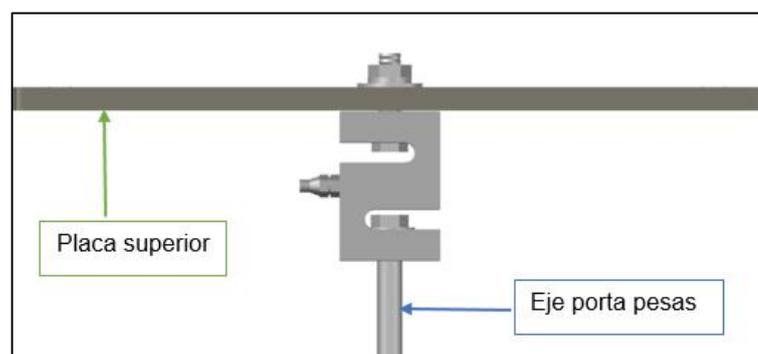


Figura 51. Sujeción celda de carga

El eje porta-pesas mantendrá a la celda en estado de tracción, sensando el peso que se le aplique a la probeta que durante el ensayo será constante. Adicionalmente se debe maquinar la placa inferior, la cual se acopla al skid de la máquina para que la celda de carga no choque, tal y como se muestra en la figuras 52 y 53.

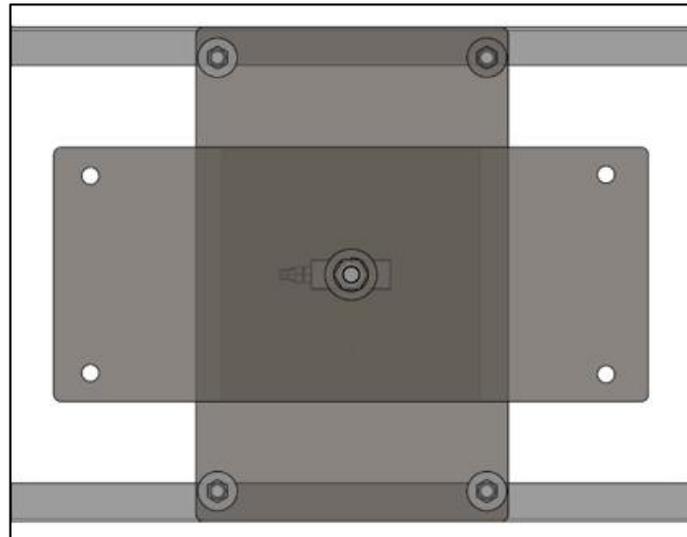


Figura 52. Vista superior - perforación placa inferior

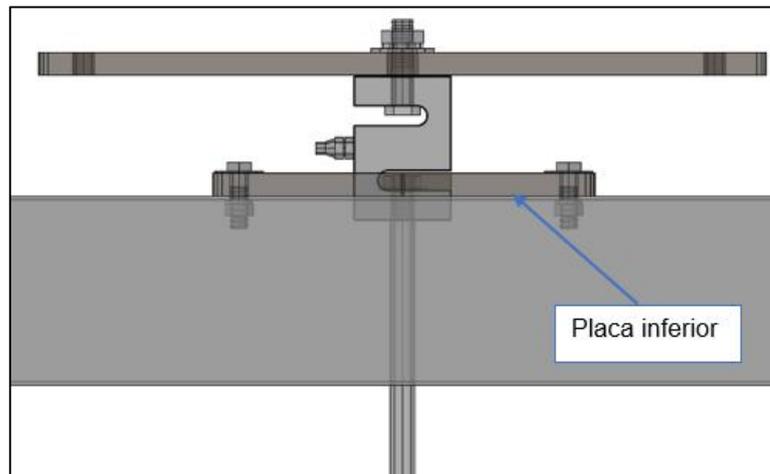


Figura 53. Vista frontal - perforación placa inferior

3.2.6. Acoplamiento encoder-motor

Se ha diseñado un coupling, acoplamiento o unión traducido del inglés, para unir el eje del motor con el eje del encoder.

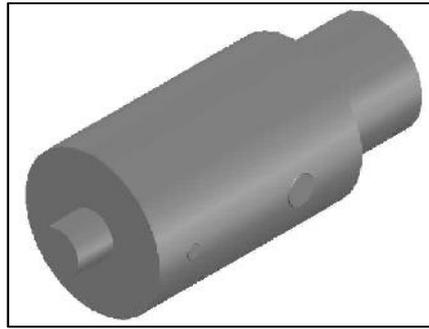


Figura 54. Coupling

Diseño:

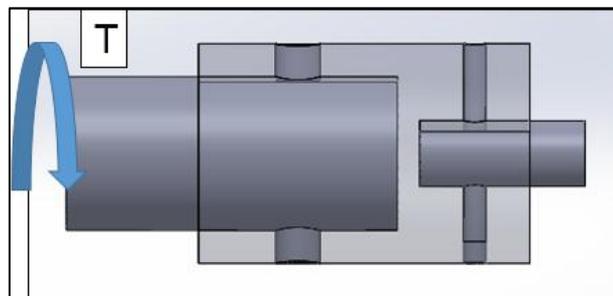


Figura 55. Vista lateral – interior coupling

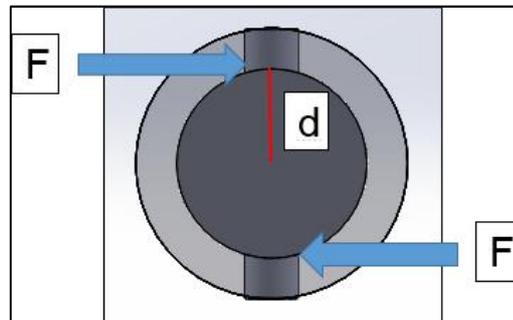


Figura 56. Vista frontal – interior coupling

Datos:

Motor:

$$T_{nominal} = 2.10 \text{ Nm}$$

Material del eje: AISI 1040

Diámetro: $e_{je} = 14\text{mm}$

Límite de Fluencia: $\sigma_{fl} = 490\text{MP}$

Los pasadores serán de material ASTM A-36 con la siguiente característica:

Límite de Fluencia: $\sigma_{fl} = 250\text{MP}$

Cálculo del diámetro de los pasadores:

$$T = F * d$$

$$F = \frac{2.10\text{Nm}}{0.007\text{m}} = 300\text{N}$$

Se utilizará un factor de seguridad $n=2$.

$$\tau_{fl} = 0.5 \sigma_{fl}$$

$$\tau_{fl} = 0.5 (250\text{MP}) = 125\text{MP}$$

$$\tau_{admisible} = \frac{\tau_{fl}}{n}$$

$$\tau_{admisible} = \frac{125\text{MPa}}{2} = 62.5\text{MP}$$

$$\tau_{admisible} = \frac{F_{perno}}{A_{perno}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$A_{perno} = \frac{\pi * d^2}{4} \quad \text{Ec. 2}$$

Reemplazamos la ecuación 2 en 1 y despejamos el diámetro del perno que se utilizará

$$d = \sqrt{\frac{4 * F_{perno}}{\pi * \tau_{adm.}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * 300 \text{ N}}{\pi * 62.5 \times 10^6 \text{ Pa}} * 1000}$$

$$d = 2.47 \text{ mm}$$

Se tomará el pasador de diámetro 2.5 mm y longitud 20 mm ya que el diámetro del coupling será de dicha longitud.

3.3. Diseño de los componentes eléctricos y electrónicos

En general los componentes eléctricos se definen como aquellos que reciben energía eléctrica y la transforman en otro tipo de energía o permiten el transporte de la energía eléctrica (Ministerio de Educación y Deportes de Argentina, 2016). Los componentes eléctricos que se prevé utilizar en este proyecto son:

- Motor trifásico de inducción
- Circuito de alimentación:
 - Instalación trifásica de 220 voltios
 - Fuente de poder de 24 VDC
- Pulsador de emergencia
- Indicadores eléctricos o luces piloto
- Borneras
- Cableado
- Protecciones eléctricas

A diferencia de los componentes electrónicos que utilizan la energía eléctrica para transmitir datos e información de todo tipo, como por ejemplo un celular que transmite la voz en una llamada, y permiten hacer el control y

automatización de procesos (Ministerio de Educación y Deportes de Argentina, 2016). Los componentes electrónicos que se estima utilizar en este proyecto son:

- Sensores y acondicionamientos:
 - Sensor de distancia
 - Celda de carga
 - Encoder
- Pantalla táctil HMI
- Variador de frecuencia
- PLC

La pantalla táctil HMI, el variador de frecuencia y el PLC se detallarán en la sección 3.4. Diseño de los componentes del sistema de control.

Con la implementación de estos dispositivos se eliminará la forma de accionamiento de la máquina que se hace a través del interruptor principal (ver figura 20) y se reemplazará por la HMI implementada en la pantalla táctil.

3.3.1. Motor trifásico de inducción

Los motores trifásicos de inducción son máquinas eléctricas que generan energía mecánica en forma de movimiento rotacional a partir de la energía eléctrica que reciben.



Figura 57. Motor trifásico de inducción convencional

Fuente: http://img.directindustry.es/images_di/photo-m2/126201-8014191.jpg

El principio de funcionamiento es el de un transformador trifásico de relación 1:1 (ver figura 58), en cada fase consta un devanado principal o inductor que constituye el estator y un devanado secundario o inducido que constituye el rotor (Guru & Hiziroglu, 2003).

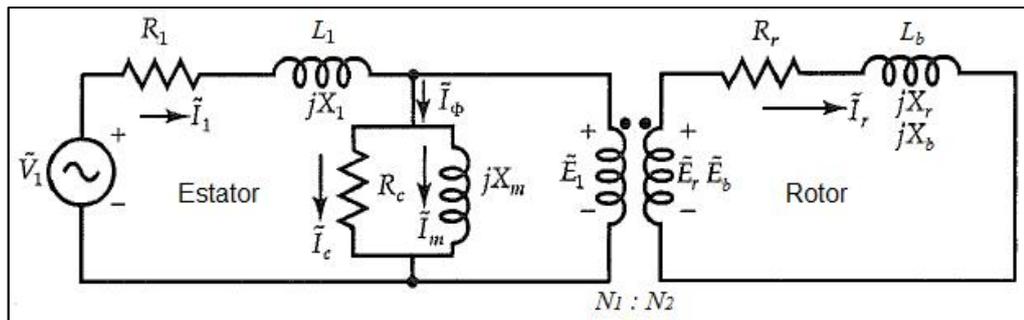


Figura 58. Circuito equivalente por cada fase de un motor trifásico de inducción

Fuente: Guru & Hiziroglu, 2003, modificada por los autores

- Donde:
- \bar{V}_1 : Voltaje aplicado por fase
 - R_1 : Resistencia por fase del devanado del estator
 - L_1 : Inductancia de dispersión por fase del devanado del estator
 - $X_1 = 2\pi f L_1$: Reactancia de dispersión por fase del devanado del estator
 - R_r : Resistencia por fase del devanado del rotor
 - L_b : Inductancia de dispersión por fase del devanado del rotor
 - $X_b = 2\pi f L_b$: Reactancia de dispersión por fase del devanado del rotor, en condición de rotor fijo ($s=1$)
 - $X_r = 2\pi s f L_b = s X_b$: Reactancia de dispersión por fase del devanado del rotor, con deslizamiento s
 - X_m : Reactancia de magnetización por fase
 - R_c : Resistencia equivalente de la pérdida en el núcleo por fase
 - N_1 : Vueltas reales o número de espiras por fase del devanado del estator
 - N_2 : Vueltas reales o número de espiras por fase del devanado del rotor
 - $k_{\omega 1}$: Factor de devanado para el devanado del estator

$k_{\omega 2}$: Factor de devanado para el devanado del rotor

Φ_m : Amplitud del flujo magnético por fase

\bar{E}_1 : Voltaje inducido por fase en el devanado del estator

\bar{E}_b : Voltaje inducido por fase en el devanado del rotor, en condición de rotor fijo ($s=1$)

$\bar{E}_r = s\bar{E}_b$: Voltaje inducido por fase en el devanado del rotor, con deslizamiento s

\bar{I}_r : Corriente por fase en el devanado del rotor

\bar{I}_r : Corriente por fase alimentada por la fuente

$\bar{I}_\phi = \bar{I}_c + \bar{I}_m$: Corriente de excitación por fase

\bar{I}_c : Corriente por fase de la pérdida en el núcleo

\bar{I}_m : Corriente de magnetización por fase

Cuando el devanado estático se conecta a una fuente de energía trifásica se produce un campo magnético rotatorio en él de acuerdo a la ley de inducción de Faraday, de ahí su nombre de *motor trifásico de inducción*. La velocidad a la que gira este campo magnético se denomina *velocidad de sincronismo* y viene dado por la siguiente fórmula:

$$N = 60 \frac{2f}{p}$$

Donde: N : velocidad en RPM

f : frecuencia de alimentación en Hz

p : número de polos del motor

Este campo magnético a su vez induce un voltaje en el devanado rotórico (ver figura 58 donde este voltaje se denomina: \bar{E}_b y \bar{E}_r). Como este devanado forma un lazo cerrado, el voltaje inducido en él genera una corriente en las bobinas que al estar bajo la influencia del campo magnético experimenta una fuerza o par motor de arranque en el eje del rotor que hace vencer su inercia del reposo y comienza a girar, la velocidad del eje será

menor a la velocidad de sincronismo y será la velocidad nominal del motor, la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad nominal se llama *deslizamiento* y se denota con la letra *s* (Guru & Hizirolu, 2003).

En el caso de los motores trifásicos, el devanado estatórico en realidad consta de tres devanados independientes que serán alimentados por cada fase eléctrica, los cuales están posicionados a 120° dentro del estator (ver figura 59), de igual forma la corriente administrada a cada devanado estará desfasada 120° respecto al tiempo, o lo que se denomina también 120° eléctricos (ver figura 59) (Kosow, 1993).

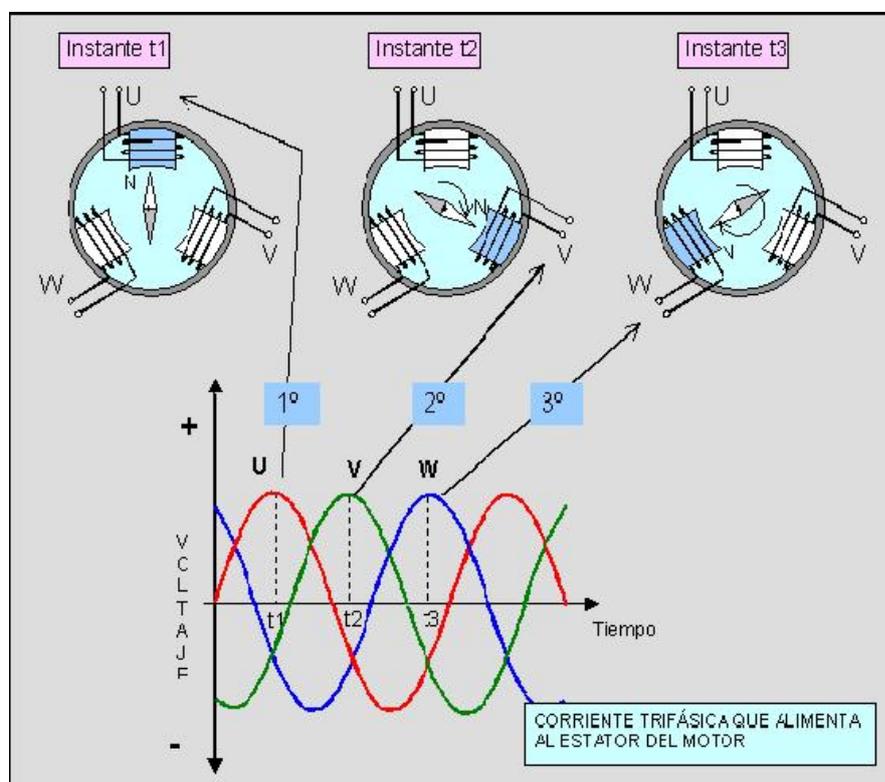


Figura 59. Disposición de los devanados dentro del estator de un motor trifásico de inducción

Fuente: <http://h4.ggpht.com/>-

OM0kkE9RIiY/UxI2Wb4cYpl/AAAAAAAADCGj/jBXrbJkAH_k/clip_image024_thumb%25255B3%25255D.gif?imgmax=800

Existen dos tipos de motores de acuerdo al rotor, motores de rotor devanado y motores de jaula de ardilla.

Rotor devanado: La colocación de las bobinas en un rotor devanado es igual que en el estator, un extremo de las bobinas se conectan entre sí

para formar una conexión neutra interna mientras que el otro extremo están conectados a anillos rozantes sobre los cuales se deslizan escobillas. El desplazamiento de estas escobillas permite agregar resistencias externas al circuito del rotor, al aumentar el valor de la resistencia del rotor, disminuye la velocidad a la que se produce el par máximo, en consecuencia se puede lograr el par máximo en velocidad cero, por esta razón estos motores son usados cuando se requiere un torque elevado de arranque. En general no son muy usados en la industria.

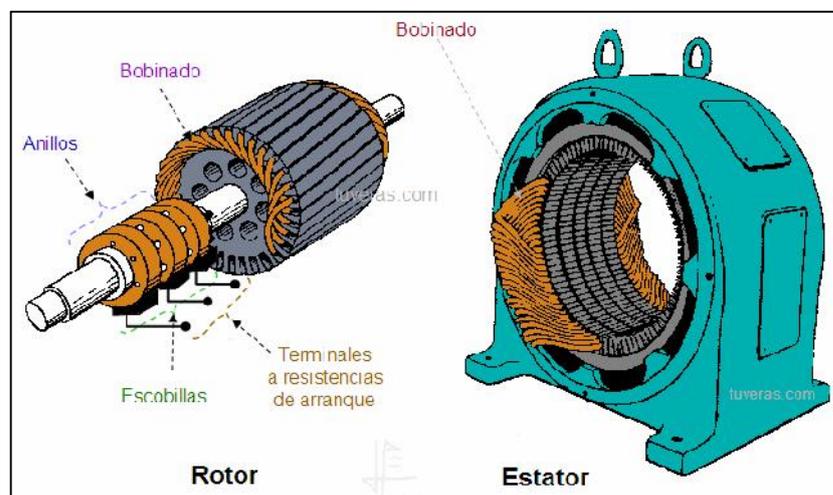


Figura 60. Motor de inducción de rotor devanado

Fuente: <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/rotorbobinado.gif>

Rotor de jaula de ardilla: También llamado rotor en cortocircuito, debido a que los extremos de los devanados se cortocircuitan para evitar una conexión del rotor con el exterior, de esta forma no existen escobillas de arranque lo que presenta una ventaja al no requerir mantenimiento. Estos motores se usan en general para todo propósito, ocupan el 95% del mercado.

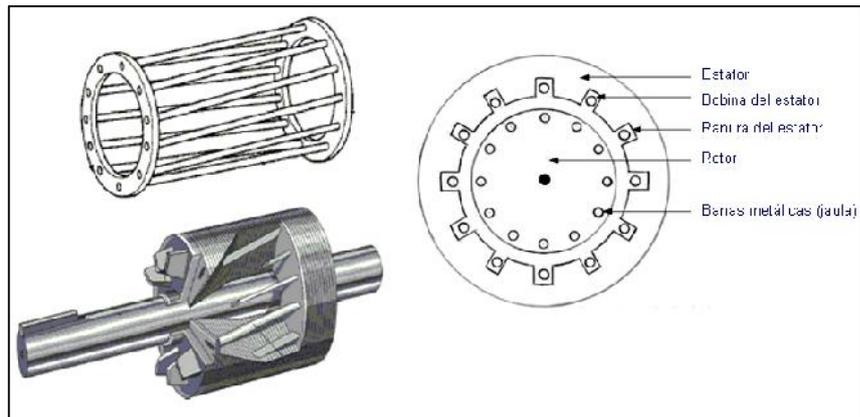


Figura 61. Motor de inducción de rotor de jaula de ardilla
Fuente: <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/esquemajaula.gif>

Un dato muy importante que hay que considerar es la corriente de arranque de los motores eléctricos en general, típicamente este valor puede ser entre un 400 y un 800% el valor de la corriente nominal (Guru & Hiziroglu, 2003).

3.3.1.1. Cálculo de la potencia del motor

Para dimensionar el motor se parte del diagrama de cargas de la máquina que se muestra en la figura 22.

Las cargas provocadas por los pesos de las chumaceras pivote y pesos de mandriles van a ser despreciadas, debido a que en el momento de los ensayos estas van a ser tomadas como una precarga o carga inicial, esta carga inicial también toma en cuenta el peso de la placa transmisora de fuerza y los pernos que unen a esta con las chumaceras pivote. (Narváz Mejía & Terán Rosero, 2004).

Por tanto el diagrama de cargas simplificado se muestra en la figura 23. con lo cual se procede a evaluar las condiciones de equilibrio del sistema:

$$\sum F_y = 0$$

$$-R_1 + \frac{P}{2} + \frac{P}{2} - R_2 = 0$$

$$P - R_1 - R_2 = 0$$

$$\sum M_A = 0$$

$$\frac{P}{2} * \overline{AB} + \frac{P}{2} * (\overline{AB} + \overline{BE} + \overline{EF} + \overline{FC}) - R_2 * (\overline{AB} + \overline{BE} + \overline{EF} + \overline{FC} + \overline{CD}) = 0$$

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

$$R_1 = R_2$$

Con las cargas halladas se procederá a realizar los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector que se muestran en las figuras 24 y 25.

Del diagrama de momento flector se puede observar que el momento flector máximo que soporta la probeta corresponde a la zona donde el área de la probeta disminuye, es decir en el centro de la misma. El momento flector máximo en dicha zona corresponde a la expresión:

$$M_{\max} = \frac{P}{2} * \overline{AB}$$

Donde:

P: peso total aplicado por las cargas estáticas a los rodamientos B y C.

\overline{AB} : La distancia entre los rodamientos A y B

El valor del momento máximo obtenido es valor del diseño de la máquina, es decir 30 kgf-M. Con la información recolectada se hallará la

carga P máxima que puede aplicarse. Despejando P de la ecuación (xx) nos queda:

$$P = \frac{2 * M_{max}}{AB}$$

$$P = \frac{2 * 30 \text{ kg} * n}{0.2 \text{ m}}$$

$$P = 300 \text{ kg}$$

Reemplazando en la ecuación (xx), se obtiene la carga que soporta la chumacera

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

$$R_2 = \frac{300}{2}$$

$$R_2 = 150 \text{ kg} \rightarrow 1471 \text{ N}$$

Una vez obtenida la carga que soportan las chumaceras es necesario conocer el par de rozamiento (torque) generado en los rodamientos de las mismas tanto de soporte como pivotes.

La fórmula para calcular dicho coeficiente es:

$$T_R = \mu * F * d/2$$

- Donde:
- T_R: par de rozamiento en N*mm
 - μ: Coeficiente de rozamiento del rodamiento que para rodamientos rígidos de bolas es 0.0015.
 - F: Carga aplicada en el rodamiento en N
 - d: Diámetro del agujero del rodamiento en mm

El par de rozamiento o torque producido por el rozamiento en los rodamientos pivote es:

$$T_{RP} = 0.0015 \cdot 1471 \cdot \frac{31.75}{2}$$

$$T_{RP} = 35.02 \text{ N} - \text{mm}$$

El par de rozamiento o torque producido por el rozamiento en los rodamientos soporte es igual que en los rodamientos pivote:

$$T_{RP} = 0.0015 \cdot 1471 \cdot \frac{31.75}{2}$$

$$T_{RP} = 35.02 \text{ N} - \text{mm}$$

Ya que en los cojinetes se produce un mínimo torque la potencia que se requiere para el motor también será pequeña debido a que no existe una gran demanda.

Para calcular la potencia requerida para el motor se utilizará la ecuación a continuación:

$$P = \frac{Tq * w}{63025}$$

Donde: Tq : Torque en lbf-pulg
 w : velocidad angular del motor
 P : Potencia del motor en HP

Como ya se calculó anteriormente el torque producido por los rodamientos tanto soporte como pivote y teniendo un total de cuatro rodamientos, la sumatoria de los mismos nos dará como resultado el torque total.

La sumatoria de los torques generados en los rodamientos da un valor de:

$$Tq = 35.02 \text{ Nmm} \times 4$$

$$Tq = 140.08 \text{ Nmm}$$

Por tanto para conocer el valor de la potencia en HP (horsepower) es necesario transformar el torque de N-mm a lb-pulg, dando un valor de 1.24 lb-pulg.

$$P = \frac{1725 \text{ rpm} * 1.24 \text{ lb-pulg}}{63025}$$

$$P = 0.033 \text{ HP}$$

En teoría se necesitaría un motor con las siguientes características:

- **Potencia:** 0.12 HP
- **Polos:** 4
- **R. Nominal:** 1725 RPM
- **Par Nominal:** 0.051 Kg-m

3.3.1.2. Especificaciones de diseño

Realizado el cálculo de potencia que se requiere para hacer funcionar la máquina de fatiga, se ha dimensionado un motor que presente las siguientes características técnicas:

- **Alimentación eléctrica:** 220 V 3Ø, 60 Hz
- **Potencia:** 1/2 HP

Para establecer este parámetro se efectuó el correspondiente cálculo mecánico (sección 3.3.1.1) y por seguridad se decidió establecer un valor igual o mayor de la potencia nominal del motor que se encuentra actualmente en la máquina que es de 200 W (figura 18), sin embargo el

mínimo valor comercial de potencia para motores trifásicos de inducción es de 1/2 HP aproximadamente 373 W.

- **Velocidad nominal:** 1650 RPM

Se ha observado que los ensayos de este tipo se realizan con una velocidad nominal de 1725 RPM, por lo cual se empleará un motor de 4 polos cuya velocidad de sincronismo es 1800 RPM pero debido al deslizamiento electromagnético existente por ser un motor asíncrono, su valor se aproxima a 1725 RPM o menor, por ello se debe procurar conseguir un motor con un valor bajo de deslizamiento.

- **Tipo de rotor:** Jaula de ardilla

Los rotores de jaula de ardilla representan una ventaja respecto a los rotores devanados, al no contener anillos rozantes y escobillas en su estructura, no requiere de mayor mantenimiento, además son de alta disponibilidad en el mercado y de bajo costo.

- **Eficiencia:** no menor a 50%

La eficiencia se *calcula* mediante la ecuación:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} \cdot 100$$

Por supuesto una reducción en este aspecto representará un ahorro económico, la eficiencia de un motor es la relación entre la potencia de salida respecto a la potencia de entrada, en el caso de un motor eléctrico la potencia de salida es la tasa de cambio de la energía mecánica que produce y se la mide en caballos de fuerza o vatios, está dada en función del par motor y la velocidad angular, la potencia de entrada es el consumo eléctrico del motor medida en vatios y está en función del voltaje, corriente y el factor de potencia, esta potencia de entrada del motor es la denominada potencia activa (Rubbiolo, y otros, 2016).

- **Factor de potencia:** no menor a 0.4

Dado que un motor trifásico de inducción representa una carga inductiva, éste consumirá una potencia reactiva además de la potencia real, denominada potencia activa. El factor de potencia es una característica

de fábrica de los motores; en vista de que la máquina no funcionará periódicamente, se implementará un motor con factor de potencia relativamente bajo, consiguiendo un ahorro económico.

Dadas estas condiciones se prevé seleccionar el motor resaltado en la tabla 11 otorgada por los fabricantes:

Tabla 11.
Catálogo de motores disponibles en el mercado

Potencia		Carcasa	Par nominal (kgfm)	Corriente con rotor libre I _n	Par con rotor trabado T _l /T _n	Par máximo T _b /T _n	Momento de inercia J (kgm ²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido d(BA)	220V						Corriente nominal I _a (A)	
								Caliente	Frio			RPM	% de la potencia nominal			Factor de potencia			
													50	75	100	50	75		100
0.09	0,12	63	0,051	5,2	3,2	3,4	0,0003	22	48	7,0	48	1725	45,0	53,0	55,0	0,44	0,52	0,61	0,704
0.12	0,16	63	0,068	4,5	2,1	2,4	0,0004	25	55	7,0	48	1710	49,0	55,0	58,0	0,45	0,57	0,66	0,830
0.18	0,25	63	0,103	4,7	2,2	2,4	0,0004	16	35	7,5	48	1710	51,0	58,0	62,0	0,45	0,58	0,67	1,14
0.25	0,33	63	0,142	4,5	2,3	2,5	0,0005	20	44	8,0	48	1720	50,0	50,0	62,0	0,44	0,55	0,64	1,05
0.37	0,5	71	0,215	4,3	2,1	2,2	0,0007	12	26	11,0	47	1680	50,0	55,0	61,0	0,46	0,59	0,68	2,10
0.55	0,75	71	0,317	5,3	2,5	2,5	0,0008	12	26	11,5	47	1690	55,0	68,0	69,0	0,46	0,67	0,66	3,05
0.75	1	80	0,422	6,8	2,4	2,7	0,0032	9	20	12,5	48	1730	75,0	78,0	78,2	0,63	0,75	0,82	3,07
1.1	1.5	80	0,627	6,4	2,5	2,8	0,0030	9	20	14,0	48	1710	76,0	79,0	79,2	0,61	0,74	0,81	4,50
1.5	2	90S	0,845	6,4	2,1	2,6	0,0049	10	22	16,5	51	1730	80,5	81,5	82,0	0,59	0,71	0,79	6,08
2.2	3	90L	1,25	5,7	2,1	2,4	0,0060	9	20	22,0	51	1720	82,0	83,0	83,1	0,62	0,74	0,81	8,58
3	4	100L	1,70	6,8	2,4	2,7	0,0097	7	15	30,0	54	1720	83,5	84,0	84,1	0,63	0,77	0,83	11,3
3.7	5	100L	2,11	6,4	2,7	2,0	0,0097	11	24	35,0	54	1710	85,0	85,5	85,5	0,63	0,75	0,81	14,0
4.5	6	112M	2,50	7,2	2,1	2,8	0,0182	8	18	42,0	58	1750	84,5	86,0	86,2	0,63	0,75	0,81	16,6
5.5	7.5	112M	3,08	6,0	2	2,7	0,0167	11	24	45,0	58	1740	86,0	87,0	87,0	0,61	0,74	0,80	20,6
7.5	10	132S	4,15	7,2	2	2,8	0,0528	8	18	65,0	61	1760	86,5	88,0	87,5	0,67	0,78	0,83	27,2
9.2	12.5	132M	5,11	6,4	1,9	2,5	0,0642	8	18	70,0	61	1755	88,0	88,5	88,0	0,69	0,79	0,84	33,0
11	15	132M	6,10	8,3	2,3	2,8	0,0563	6	13	75,0	61	1755	87,0	88,5	88,6	0,68	0,80	0,83	39,2
15	20	160M	8,28	6,2	2,1	2,6	0,1046	9	20	105	64	1765	89,0	90,0	90,2	0,62	0,68	0,73	84,0
18.5	25	160L	10,2	6,3	2,2	2,7	0,1253	9	20	122	64	1765	89,5	91,0	91,0	0,68	0,79	0,84	63,6
22	30	190M	12,2	6,0	2,2	2,5	0,1392	12	26	150	64	1760	89,6	91,0	91,1	0,68	0,79	0,84	75,4
30	40	200M	16,5	6,0	2	2,4	0,2405	12	26	195	68	1770	91,0	91,8	91,8	0,71	0,80	0,85	101
37	50	200L	20,4	6,0	2	2,4	0,2918	12	26	222	68	1770	92,0	92,5	92,5	0,71	0,81	0,85	123
45	63	225S/M	24,7	6,8	2,3	2,6	0,4914	10	22	367	70	1775	92,3	93,1	93,1	0,75	0,83	0,87	145
55	75	225S/M	30,2	6,9	2,3	2,6	0,5632	9	20	306	70	1775	92,0	93,4	93,2	0,75	0,83	0,87	170
75	100	250S/M	41,2	7,0	2,4	2,7	0,8767	10	22	470	70	1775	93,0	93,5	93,6	0,75	0,84	0,88	238
90	125	280S/M	49,2	6,5	1,9	2,5	1,47	17	37	625	73	1780	93,0	93,9	94,0	0,74	0,82	0,86	292
110	150	280S/M	60,0	7,3	2,2	2,7	1,87	16	35	684	73	1785	93,2	94,1	94,2	0,74	0,83	0,86	355
132	180	315S/M	71,8	6,5	2	2,3	2,33	24	53	880	75	1790	93,0	94,3	94,6	0,73	0,81	0,85	430
152	180	315S/M	71,8	6,5	2	2,3	2,33	24	53	880	75	1790	93,0	94,3	94,6	0,73	0,81	0,85	430
150	200	315S/M	91,6	8,0	2	2,4	2,80	20	44	947	75	1790	93,5	94,5	94,7	0,74	0,83	0,86	494
185	250	315S/M	101	6,6	2,1	2,3	3,42	17	37	1018	75	1790	94,0	94,5	94,5	0,75	0,83	0,86	595
200	270	315S/M	106	7,3	2,3	2,3	3,75	16	40	1062	75	1790	94,2	94,9	95,0	0,76	0,83	0,86	642
220	300	315L	120	6,6	2,3	2,4	5,80	16	35	1180	79	1790	94,4	94,9	95,2	0,75	0,83	0,86	705
250	350	315L	141	7,6	2,5	2,5	6,85	13	29	1287	79	1790	94,6	95,2	95,4	0,75	0,83	0,87	822
300	400	315L	163	7,7	2,7	2,6	8,12	14	31	1398	79	1790	94,8	95,3	95,6	0,76	0,84	0,87	945
330	450	355M/L	180	7,0	2,1	2,3	8,51	19	42	1662	81	1790	95,2	95,6	95,7	0,77	0,83	0,86	1050
370	500	355M/L	201	7,6	2,5	2,6	11,2	12	26	1833	81	1790	95,3	95,7	95,8	0,75	0,82	0,85	1190
400	550	355M/L	218	7,3	2,5	2,6	11,1	17	31	1916	81	1790	95,4	95,8	95,8	0,74	0,82	0,86	1270
440	600	355M/L	235	7,1	2,2	2,5	11,6	16	35	1986	81	1790	95,5	95,9	96,0	0,74	0,82	0,86	1430

Fuente: WEG, W22 Motor Eléctrico Trifásico Catálogo Técnico Mercado Latinoamericano, sección datos eléctricos W22 - IE1 Standard Efficiency - 60 Hz

La corriente de arranque de este motor se describe en la tabla 11 como *corriente con rotor trabado*, cuyo valor es de 4.3 veces la corriente nominal, por lo tanto para este motor que se pretende instalar en la máquina de fatiga, la corriente de arranque sería de 9.03 amperios.

3.3.2. Circuito de alimentación

Los dispositivos eléctricos y electrónicos de este proyecto trabajarán con voltaje en corriente alterna y corriente continua, por lo tanto se debe

diseñar la circuitería adecuada para separar ambos tipos de energía eléctrica y garantizar que los dispositivos estén alimentados con el tipo y valor adecuado de voltaje. A continuación se detallan las especificaciones de alimentación de los mismos:

- **Motor trifásico de inducción:** 220 V 3Ø, 60 Hz
- **Pantalla táctil HMI:** 24 VDC
- **Variador de frecuencia:** 220 V 3Ø, 60 Hz
- **PLC:** 220 V, 60 Hz
- **Sensor de distancia:** 24 VDC
- **Celda de carga:** 24 VDC
- **Encoder:** 24 VDC

3.3.2.1. Instalación trifásica

El laboratorio de Mecánica de Materiales cuenta con tomas de alimentación trifásica, se comprobó la correcta operatividad de sus líneas mediante un voltímetro y se llegó a la conclusión de que se pueden conectar normalmente los dispositivos que requieran 220 voltios trifásicos sin necesidad de una etapa de acondicionamiento.

3.3.2.2. Fuente de poder

Una fuente de poder consta de un rectificador de onda completa con una etapa posterior de filtrado y regulación de la señal (ver figura 62). Para este proyecto se seleccionará del mercado una fuente confiable que evite fallas en los dispositivos por sobretensión, sobrecarga y/o cortocircuito y suministre la potencia necesaria para abastecer a todos los dispositivos que trabajen a 24 VDC.

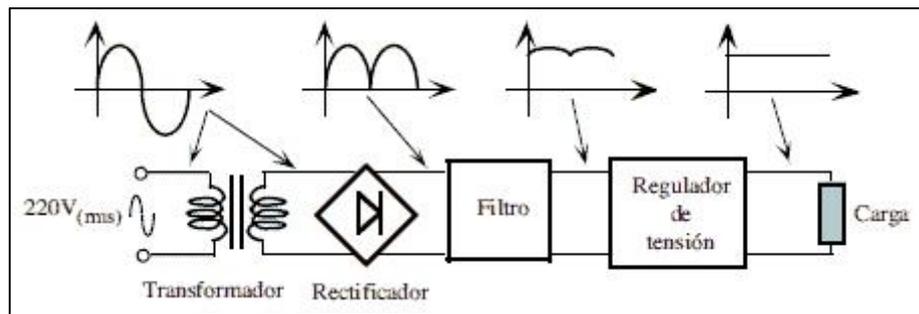


Figura 62. Diagrama de bloques de una fuente de poder
Fuente: http://unicrom.com/wp-content/uploads/Diagrama_bloques_fuente_regulada.gif,
modificada por los autores

El PLC que se pretende implementar dispone de una fuente de 24 VDC, sin embargo se recomienda utilizar una fuente independiente para los dispositivos que funcionarán con corriente continua especialmente para la pantalla táctil HMI, de hecho en el manual de la pantalla se menciona que ésta debe estar alimentada por una fuente aislada (ver tabla 18), así que se implementará una fuente de poder considerando el dimensionamiento pertinente.

Se puede verificar el consumo energético en corriente de todos los dispositivos que se alimentarán con 24 VDC directamente en los manuales de usuario, en caso de no registrar este dato se deberá encontrar el consumo en potencia y por ley de ohm calcular el consumo en corriente, para dispositivos que funcionan con corriente continua la fórmula es:

$$P = IV$$

A continuación se detallará el consumo en corriente de los dispositivos a 24 VDC:

Pantalla táctil HMI: 7.2 W, 14.4 W con un factor de seguridad de 2 (ver tabla 18), lo que representa: 600 mA

Sensor de distancia: 200 mA (ver tabla 17)

Celda de carga: 40 mA. En la figura 76 se observa que la celda de carga propuesta funciona con un voltaje entre 10 y 15 VDC y su resistencia de

entrada es de 385 ohmios aproximadamente, por lo tanto el consumo en corriente máximo que tendría la celda es de 38.96 mA.

Encoder: 60 mA. El consumo en corriente de este tipo de dispositivos es relativamente pequeño ya que su respuesta es digital como el caso de un microcontrolador, así que se estimará un valor de 60 mA.

Por lo tanto se requiere de una fuente de poder que suministre mínimo 900 mA de corriente, valor que pudiera aumentar ante la posible implementación de otros componentes tales como el acondicionamiento de los sensores.

Normalmente en el mercado se disponen equipos con valores de salida en corriente de 2, 2.5, 5, 10 y 20 A. Para este proyecto se optará por la fuente de 2.5 A de salida, cuyas características se detallan a continuación:

Tabla 12.
Especificaciones técnicas fuente de poder

Input Ratings / Characteristics	
Nominal Input Voltage	100-240Vac
Input Voltage Range	85-264Vac
Nominal Input Frequency	50-60Hz
Input Frequency Range	47-63Hz
DC Input Voltage Range*	120-375Vdc
Input Current	< 1.10A @ 115Vac, < 0.70A @ 230Vac
Efficiency at 100% Load	> 86.0% @ 115Vac, > 87.0% @ 230Vac
Max Inrush Current (Cold Start)	< 40A @ 115Vac, < 80A @ 230Vac
Leakage Current	< 1mA @ 240Vac
*Safety approval according to IEC/EN/UL 60950-1	
Output Ratings / Characteristics	
Nominal Output Voltage	24Vdc
Output Voltage Tolerance	± 2% (initial set point tolerance from factory)
Output Voltage Adjustment Range	22-28Vdc
Output Current	2.50A (continuously operating at 24V) 3.75A (Power Boost for 3 seconds at 24V, refer to the details in the Functions section)
Output Power	60W (continuously operating at 24V) 90W (Power Boost for 3 seconds at 24V, refer to the details in the Functions section)
Line Regulation	< 0.5% (@ 85-264Vac input, 100% load)
Load Regulation	< 1% (@ 85-264Vac input, 0-100% load)
PARD (20MHz)	< 240mVpp
Rise Time	< 100ms @ nominal input (100% load)
Start-up Time	< 2,500ms @ nominal input (100% load)
Hold-up Time	> 20ms @ 115Vac, > 125ms @ 230Vac (100% load)
Dynamic Response (Overshoot & Undershoot O/P Voltage)	± 5% @ 10-90% load
Start-up with Capacitive Loads	8,000µF Max

Fuente: Delta, Technical Datasheet CliQ DIN Rail Power Supply, sección especificaciones.

3.3.3. Pulsador de emergencia

Conocido comúnmente como *paro de emergencia*, es un pulsador con enclavamiento tipo hongo (figura 63) que se encarga de detener por completo el sistema al momento de ser accionado. Se instalará en la tapa frontal de la caja de control a pocos milímetros de la pantalla táctil HMI (leer sección 3.2.1. Caja de control, ver figura 36).



Figura 63. Pulsador de emergencia

Fuente: <http://es.rs-online.com/largeimages/R4258433-01.jpg>

En este proyecto el pulsador de emergencia enviará una señal digital al PLC (0 o 24 VDC) y éste la enviará a la pantalla HMI, entonces la pantalla tomará la decisión de detener el proceso por lo que mandará una señal al variador de frecuencia para que detenga el motor, este proceso se muestra gráficamente en la figura 64. Adicionalmente la pantalla mostrará un mensaje informando que se ha accionado el pulsador de emergencia. Para ver la conexión eléctrica dirigirse a los planos eléctricos en Anexos.

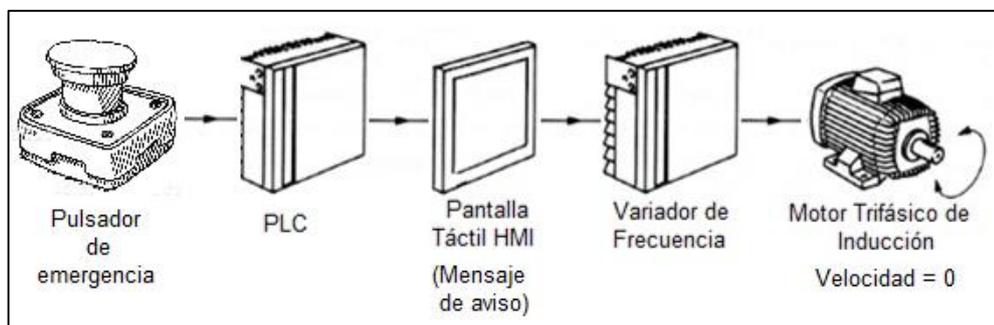


Figura 64. Diagrama funcionamiento paro de emergencia

Los contactos del pulsador de emergencia a menudo son normalmente cerrados. En este caso deben ser para corriente continua, así que de la tabla 13 se prevé escoger la categoría DC-13 para contactos.

Tabla 13.
Especificaciones técnicas del contacto del pulsador de emergencia

Categorías de empleo para contactos y contactores auxiliares según IEC 60947-5-1	
Empleo en corriente alterna	
Categoría AC-14 (1)	Se aplica al control de cargas electromagnéticas en las que la potencia absorbida, cuando el electroimán está cerrado, es inferior a 72 VA. Ejemplo de utilización: control de bobina de contactores y relés.
Categoría AC-15 (1)	Se aplica al control de cargas electromagnéticas en las que la potencia absorbida, cuando el electroimán está cerrado, es inferior a 72 VA. Ejemplo de utilización: control de bobina de contactores.
Empleo en corriente continua	
Categoría DC-13 (2)	Se aplica al control de cargas electromagnéticas en las que el tiempo empleado en alcanzar el 95% de la corriente en el régimen establecido ($T = 0,95$) es 6 veces superior a la potencia P absorbida por la carga (con $P \leq 50$ W). Ejemplo de utilización: control de bobina de contactores sin resistencia de economía.
(1) Sustituye a la categoría AC-11. (2) Sustituye a la categoría DC-11.	

Fuente: Schneider Electric, Contactores, sección generalidades, página 5/159.

3.3.4. Indicadores eléctricos

Se instalarán dos indicadores eléctricos, llamados comúnmente luces piloto, de color verde y color rojo en la tapa frontal de la caja de control (leer sección 3.2.1. Caja de control, ver figura 36), y funcionarán de la siguiente manera:

- **Color verde:** Permanecerá encendido mientras esté accionado el sensor de distancia.
- **Color rojo:** Únicamente se encenderá mientras el pulsador de emergencia esté accionado.



Figura 65. Luces piloto

Fuente: <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB16Wj3LpXXXXcEXXXq6xXFXXXo/2-Pcs-AD16-22D-S-Green-Red-font-b-LED-b-font-font-b-Pilot-b.jpg>

Las luces piloto deberán ser a 220 VAC y estarán conectadas en las salidas del PLC, para ver la conexión eléctrica dirigirse a los planos

eléctricos en Anexos. Un dato importante es el hecho de que deben consumir un máximo de 2 A porque esa es la cantidad máxima de corriente que soportan las salidas del PLC (ver tabla 21).

3.3.5. Borneras

Una bornera es un conector eléctrico que permite ampliar el número de tomas en una instalación eléctrica. Por esta razón serán utilizadas para incrementar el número de salidas a 24 VDC proveniente de la fuente de poder, según como se observa en la tabla 14, el número de cable que se instalará en la salida de la fuente será AWG18, por lo tanto las borneras deberán ser para este calibre de cable

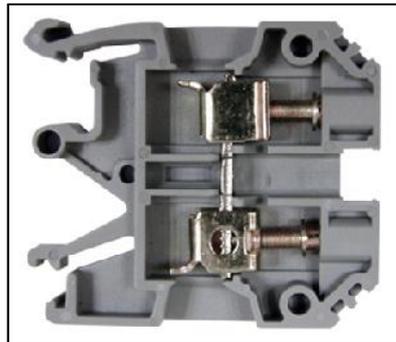


Figura 66. Bornera para riel din

Fuente: <http://www.kersting.cl/media/productos/5373103.jpg>

3.3.6. Cableado

3.3.6.1. Cableado eléctrico

Dado que este proyecto funcionará con baja tensión, se implementará cable flexible multifilar para las conexiones eléctricas, entonces se debe verificar el consumo energético en amperios de los dispositivos, generalmente los fabricantes indican el valor de corriente que consumen los dispositivos, en caso de que no se disponga de este dato, se aplica la fórmula de la potencia en función de la corriente

Para dispositivos en corriente continua es:

$$P = IV$$

Para dispositivos monofásicos:

$$P = IV \cos \phi$$

Para dispositivos trifásicos:

$$P = \sqrt{3} IV \cos \phi$$

Además hay que tomar en cuenta la corriente que ingresa en el PLC a través de las entradas digitales y analógicas proveniente de los sensores así como también la corriente de salida del PLC hacia las luces piloto, según el manual de sistema (tabla 21) las entradas digitales consumen hasta 4 mA, las entradas analógicas con un rango de 0 a 10 V y una impedancia de 100 k Ω consumirían entre 0 y 0.1 mA, las salidas soportan hasta 2 A.

Se tomará como base la tabla 14 para el dimensionamiento del cableado.

Tabla 14.
Dimensionamiento de cables eléctricos

Calibre A.W.G	Diámetro mm	Sección mm ²	Intensidad en amperios			
			Aire libre		3 conductores en tubo	
			TW	desnudo	TW	asbesto
0000	11.58	107.20	300	370	195	340
000	10.38	85.00	260	320	165	285
00	9.36	67.42	225	275	145	250
0	8.25	53.48	195	235	125	225
2	6.54	33.62	140	175	95	165
4	5.18	21.15	105	130	70	120
6	4.11	13.29	80	100	55	95
8	3.26	8.32	55	70	40	70
10	2.59	5.29	40	55	30	55
12	2.05	3.29	25	40	20	40
14	1.62	2.08	20	30	15	30
16	1.29	1.29	12	16	8	16
18	1.02	0.85	8	12	6	12

Fuente: <http://unicrom.com/wp-content/uploads/caracteristicas-conductores-cobre.gif>

A continuación se detallará el consumo en amperios de cada dispositivo:

Motor trifásico de inducción: 2.10 A (corriente nominal)

Debido a que el motor arrancará por medio del variador de frecuencia, la corriente de arranque será igual o menor a la corriente nominal.

Pantalla táctil HMI: 7.2 W (ver tabla 18), pero aplicando un factor de seguridad de 2 la pantalla consumiría 14.4 W, lo que representa: 0.60 A

Variador de frecuencia: 3.50 A (ver tabla 20, modelo de variador SV 004 le5-2)

PLC: 0.09 A (ver tabla 21)

Fuente de poder: 0.70 A (ver tabla 12)

Sensor de distancia: 200 mA (ver tabla 17)

Celda de carga: 40 mA (ver figura 76)

Encoder: 60 mA. El consumo en corriente de este tipo de dispositivos es relativamente pequeño ya que su respuesta es digital como el caso de un microcontrolador.

Además hay que tomar en cuenta la corriente de salida de los sensores que entrarán en el PLC, según el manual de sistema (tabla 21) las entradas digitales consumen hasta 4 mA, las entradas analógicas con un rango de 0 a 10 V y una impedancia de 100 k Ω consumirían entre 0 y 0.1 mA. Por último hay que considerar las luces piloto que se conectarán a las salidas del PLC que consumen hasta 2 A.

En conocimiento de esta información, se implementará cable AWG16 y AWG18 para las conexiones eléctricas de este proyecto, dirigirse a los planos eléctricos en la sección Anexos para verificar el nombre de cada línea del circuito, en la tabla 15 se da un resumen del calibre de cable que se colocará en cada línea eléctrica:

Tabla 15.
Calibre de cable a utilizarse

Descripción	Línea Eléctrica	Consumo en corriente (A)	Calibre de cable
Entrada disyuntor F1; Alimentación VDF, PLC, fuente de poder 24 VDC	L1	4.29	AWG16
	L2	4.29	AWG16
	L3	4.29	AWG16
Salida disyuntor F1; Alimentación VDF	L11	3.50	AWG16
	L21	3.50	AWG16
	L31	3.50	AWG16
Entrada disyuntor F2; Alimentación PLC	L11	0.09	AWG18
	L21	0.09	AWG18

Salida disyuntor F2; Alimentación PLC	L12	0.09	AWG18
	L22	0.09	AWG18
Entrada disyuntor F3; Alimentación fuente de poder 24 VDC	L11	0.70	AWG18
	L21	0.70	AWG18
Salida disyuntor F3; Alimentación fuente de poder 24 VDC	L13	0.70	AWG18
	L23	0.70	AWG18
Salida Alimentación trifásico VDF; motor	U1	2.10	AWG16
	V1	2.10	AWG16
	W1	2.10	AWG16
Alimentación fuente de poder -12 y 12 VDC	L	0.70	AWG 18
	N	0.70	AWG 18
Salida fuente de poder 24 VDC; Alimentación pantalla HMI	101	0.60	AWG18
	102	0.60	AWG18
Salida fuente de poder 24 VDC; Alimentación sensor de distancia	101	0.20	AWG18
	102	0.20	AWG18
Salida fuente de poder 24 VDC; Alimentación encoder	101	0.06	AWG18
	102	0.06	AWG18
Salida fuente de poder -12 y 12 VDC; Alimentación celda de carga	202	0.04	AWG18
	203	0.04	AWG18
Salida fuente de poder -12 y 12 VDC; Alimentación acondicionamiento celda de carga	201	0.05	AWG 18
	202	0.05	AWG 18
	203	0.05	AWG 18
Salida celda de carga; Entrada acondicionamiento celda de carga	204	menor a 0.01	AWG 18
	205	menor a 0.01	AWG 18
Salida fuente de poder 24 VDC; Entrada pulsador de emergencia	101	0.004	AWG 18
Salida pulsador de emergencia; Entrada PLC I0.7	105	0.004	AWG 18
Salida encoder; Entrada PLC I0.0	103	0.004	AWG 18

Salida sensor de distancia; Entrada PLC I0.5	104	0.004	AWG 18
Salida fuente de poder 24 VDC; Entrada PLC 1M	102	0.012	AWG 18
Salida acondicionamiento celda de carga; Entrada PLC AI0	206	0.0001	AWG 18
Salida fuente de poder -12 y 12 VDC; Entrada PLC 2M	203	0.0001	AWG 18
Salida disyuntor Alimentación HL1	F1; L21	2	AWG 18
Salida disyuntor Alimentación HL2	F1; L21	2	AWG 18
Salida disyuntor Entrada PLC 1L	F1; L11	4	AWG 18
Salida PLC Entrada HL1	Q0.0; L24	2	AWG 18
Salida PLC Entrada HL2	Q0.1; L25	2	AWG 18

3.3.6.2. Cableado de comunicación

El cableado de comunicación se implementará para comunicar los dispositivos de la red industrial (ver sección 3.4.1).

Cable RS-485: Comunicación pantalla táctil HMI – Variador de frecuencia

- La pantalla táctil HMI que se implementará es compatible con comunicación serial a través de un cable RS-485 (ver tabla 18), se debe conocer cómo es el puerto RS-485 en la pantalla para construir el cable, en el manual de usuario se observa que el tipo de este puerto es un conector DB9 hembra y posee tres configuraciones para su conexión: MODE1-COM2, MODE2-COM1 y MODE2-COM2, mismas que se detallan en la figura 67.

COM Port	PIN	MODE1		MODE2		MODE3	
		COM1	COM2	COM1	COM2	COM1	COM2
		RS-232	RS-485	RS-485	RS-485	RS-232	RS-422
	1			D+			TXD+
	2	RXD				RXD	
	3	TXD				TXD	
	4		D+		D+		RXD+
	5	GND		GND		GND	
	6			D-			TXD-
	7	RTS					
	8	CTS					
	9		D-		D-		RXD-

Note1: Blank = No Connection.

Figura 67. Definición de puerto serial de la pantalla táctil HMI

Fuente: Delta DOP-B03, Manual de usuario, sección definición de puerto de comunicación serial

- El variador de frecuencia que se implementará de igual forma es compatible con comunicación serial a través de RS-485 (ver tabla 20), para la construcción del cable se debe verificar el puerto RS-485 del variador que según el manual de usuario consta de una bornera con dos terminales llamados S+(P) y S-(N) (ver figura 68).

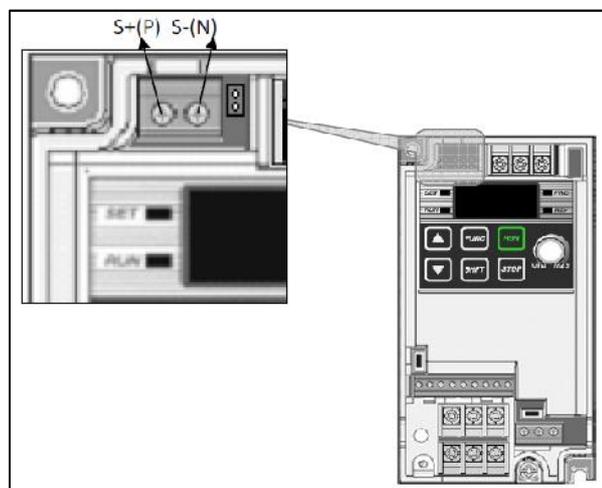


Figura 68. Puerto de comunicación RS-485 VFD

Fuente: LS SV-iE5, Manual de usuario, capítulo opción de comunicación, sección opción COM (RS-485)

En consecuencia se debe construir un cable de dos hilos con un conector DB9 macho en un extremo y sin conector en el otro extremo.

Cable Ethernet: Comunicación pantalla táctil HMI – PLC

Tanto la pantalla táctil HMI como el PLC que se implementarán son compatibles con comunicación Ethernet (ver tabla 18 y tabla 21), en cada dispositivo el puerto de comunicación es mediante conector universal RJ45; se utilizará un cable Ethernet en configuración cruzada que se utiliza para la comunicación entre dispositivos electrónicos. Para programar el PLC se requiere comunicarlo con una PC, dicha comunicación seguramente requerirá cable Ethernet en configuración directa. Las configuraciones directa y cruzada del cable Ethernet se muestran en la figura 69.

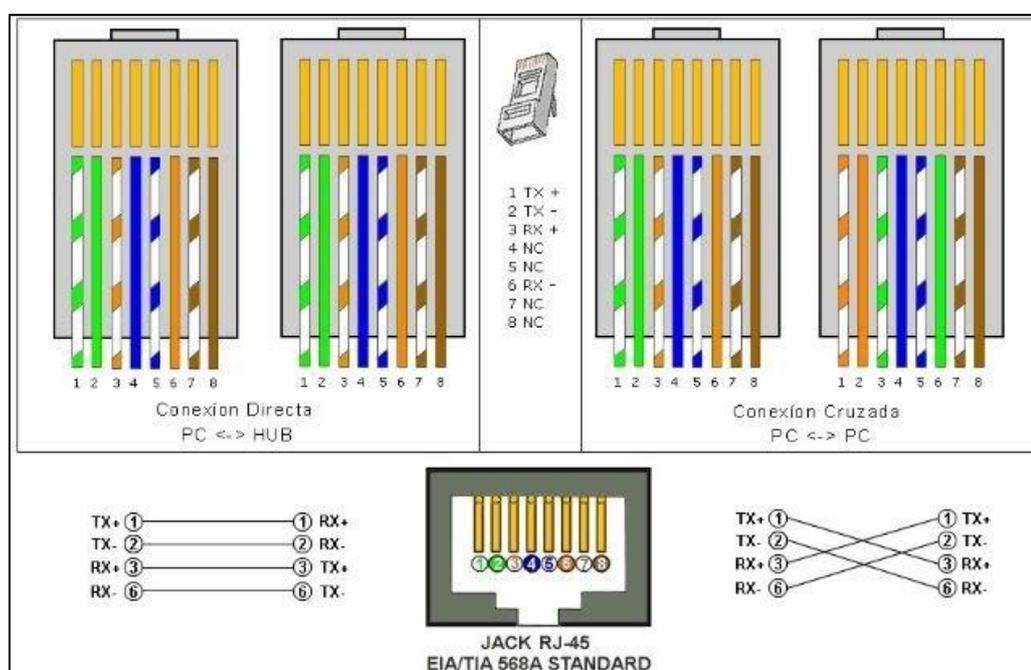


Figura 69. Forma de construcción de un cable Ethernet cruzado

Fuente:

<https://ugc.kn3.net/i/760x/http://i876.photobucket.com/albums/ab326/gambetta/blog%20subidas/cable.jpg>

3.3.7. Protecciones eléctricas

La protección eléctrica debe garantizar la minimización de daños en los dispositivos que pudieran ocurrir como consecuencia de una sobrecarga y/o un cortocircuito, por esta razón se implementarán disyuntores magnetotérmicos.



Figura 70. Disyuntores magnetotérmicos

Fuente:

http://ab.rockwellautomation.com/resources/images/allenbradley/gl/medlrgprod/1489-M_CircuitBreakerFamily_front1--large_312w255h.jpg

Los dispositivos que contarán con disyuntores magnetotérmicos serán los que se alimenten con corriente alterna, cuyo consumo en corriente es:

- **Variador de frecuencia:** 3.5 A (ver tabla 20, modelo de variador SV 004 iE5-2)
- **PLC:** 0.09 A (ver tabla 21)
- **Fuente de poder:** 0.70 A (ver tabla 12)

De acuerdo a las especificaciones de estos dispositivos y considerando que el dimensionamiento de los disyuntores debe ser 1.25 veces su consumo de corriente debido a los picos de disparo, los disyuntores deben tener las siguientes características:

- **Disyuntor para VDF:** Tripolar de 4.375 A
- **Disyuntor para PLC:** Bipolar de 0.1152 A
- **Disyuntor para fuente de poder:** Bipolar de 0.875 A

Los valores de corriente nominal de los disyuntores en el mercado son: 1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 amperios (ver tabla 16). Por lo tanto se colocará los siguientes disyuntores comerciales:

- **Disyuntor para VDF:** Tripolar de 6 A
- **Disyuntor para PLC:** Bipolar de 1 A
- **Disyuntor para fuente de poder:** Bipolar de 1 A

Tabla 16.
Especificaciones técnicas de los disyuntores

Tipo	MCB			
	BKN	BKN-c	BKN-b	
Protección	Sobrecarga y cortocircuito		Sobrecarga y cortocircuito	
Corriente nominal	1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63A		1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63A	
Curva característica	Curva característica B, C, D		Curva característica B, C, D	
Número de polos	1p, 1p+N, 2p, 3p, 3p+N, 4p		1p, 1p+N, 2p, 3p, 3p+N, 4p	
Poder de corte	1 polo	2-4 polos	1 polo	2-4 polos
	1A - 63A 6kA at 230/400VAC	1A - 63A 6kA at 400VAC	1A - 63A 10kA at 230/400VAC	1A - 63A 10kA at 400VAC
Estánda	IEC 60898		IEC 60898	
Aprobación	CCC, SABS, SEMKO CB		CCC1, KEMA CB, SABS, SEMKO CB, UL 1077†	
Tipo de disparo	Termo-magnético		Termo-magnético	
Durabilidad eléctrica	6000 operaciones		8000 operaciones	

Fuente: LS, Mini Interruptores Termomagnéticos e Interruptores diferenciales, sección Interruptores termomagnéticos tipo miniatura, pág. 6

Los dispositivos que funcionan con corriente directa serán protegidos mediante la fuente de poder que se instale, por ello la importancia de adquirir en el mercado una fuente confiable.

3.3.8. Sensores y acondicionamientos

3.3.8.1. Sensor de distancia

El objetivo de este sensor es el de notificar al sistema de control que el ensayo de fatiga ha terminado, por lo que detectará la desalineación del eje de la máquina, cabe recordar que el eje debe estar correctamente alineado al momento que la probeta se encuentra fijada en los mandriles (ver sección 4.4.2.1. Parámetros para realización del ensayo), por ello este sensor debe detectar la variación de distancia que se produce al romperse la probeta y desalinearse el eje.

En vista de que el eje está construido de acero y la distancia que recorre al desalinearse es de aproximadamente 6 mm, se optó por un sensor inductivo de proximidad que detecta materiales metálicos a distancias muy cortas como se observa en la figura 71.

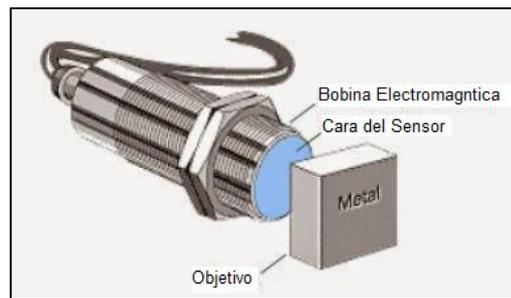


Figura 71. Sensor inductivo de proximidad

Fuente: [http://2.bp.blogspot.com/-](http://2.bp.blogspot.com/-ABxaeL9UTWI/VKsxok5JNUI/AAAAAAAAABcw/uAIJ4wRAUYs/s1600/sensor%2Binductivo.JPG)

[ABxaeL9UTWI/VKsxok5JNUI/AAAAAAAAABcw/uAIJ4wRAUYs/s1600/sensor%2Binductivo.JPG](http://2.bp.blogspot.com/-ABxaeL9UTWI/VKsxok5JNUI/AAAAAAAAABcw/uAIJ4wRAUYs/s1600/sensor%2Binductivo.JPG)

3.3.8.1.1. Especificaciones de diseño

Se dispondrá que el sensor tenga las siguientes características:

- **Alimentación:** 24 VDC
- **Tipo de salida:** Digital, 0 y 24 VDC
- **Rango de entrada:** 4-10 mm (valor para el cual la respuesta del sensor es de uno lógico)

Ante estas especificaciones, se implementara un sensor similar al mostrado en la tabla 17

Tabla 17.
Especificaciones técnicas sensor de distancia

Especificaciones	
Corriente de carga	<200 mA
Carga capacitiva	<1 μ F
Corriente de fuga	\leq 10 mA
Voltaje de operación	10...30 VCC
Caída de voltaje	\pm 1 VCC a 200 mA
Capacidad de repetición	<10% a temperatura constante
Histéresis	10% típico

Selección de productos				
Diám. del cuerpo	Distancia de detección nominal [mm (pulg.)]	Blindado	Configuración de salida	Frecuencia de conmutación [Hz]
12 mm	2 (0.08)	Si	N.A.	NPN
				PNP
	4 (0.16)	No	N.A.	NPN
				PNP
	2 (0.08)	Si	N.C.	NPN
				PNP
	4 (0.16)	No	N.C.	NPN
				PNP

Fuente: Allen-Bradley, Sensores de proximidad inductivos, página 2-22 y 2-23

3.3.8.2. Celda de carga

Se implementará una celda de carga con la finalidad de determinar el peso aplicado a la probeta durante el ensayo de fatiga (leer sección 3.1.1. Funcionamiento de la máquina y sección 2.1.2. Máquina de ensayos de fatiga tipo R. R. Moore) y mostrarlo en la pantalla táctil HMI. La celda de carga es un transductor diseñado para soportar cargas de tensión, compresión y flexión generadas por esfuerzos mecánicos, en su interior tiene sensores conocidos como galgas extensiométricas las cuales detectan valores de deformación y son parte de circuitos de acondicionamiento tipo puente de Wheatstone que generan una señal en el orden de los milivoltios, generalmente en el rango de 0 a 12 mV.

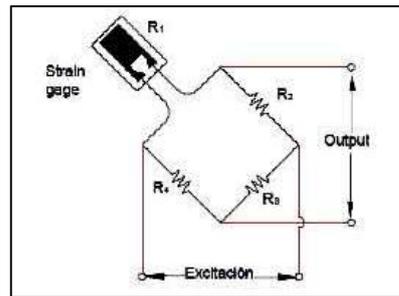


Figura 72. Circuito de acondicionamiento tipo puente de Wheatstone

Fuente: http://www.bvs.sld.cu/revistas/ibi/vol27_3-4_08/ibi10308.htm

Existen varios tipos de celdas de carga, como son:

Celda de carga de un solo punto: Este tipo de celda es utilizada en sistemas de pasaje de pequeña escala entre 200 g y 50 kg para actividades como pesar joyas o balanzas de cocina.



Figura 73. Celda de carga de un solo punto

Fuente: <http://cardinalscales.com/wp-content/uploads/2015/08/Celda-de-carga-Solo-Punto-delgada.jpg>

Celda de carga de compresión: Este tipo de celdas de carga son hechas a partir de materiales resistentes como el acero y el acero inoxidable ya que son diseñadas para soportar una alta capacidad de carga como es el pesaje de silos, tanques, tolvas, etc.



Figura 74. Celda de carga de compresión
Fuente: http://es.omega.com/pressure/images/LCGD_1.jpg

Celda de carga tipo S: Este tipo de celda es utilizada en procesos de sensado que involucre tensión y compresión. Son utilizadas en sistemas de alta escala como es el pesaje de tolvas, conversión de básculas de camiones, pesaje de tanques, etc.

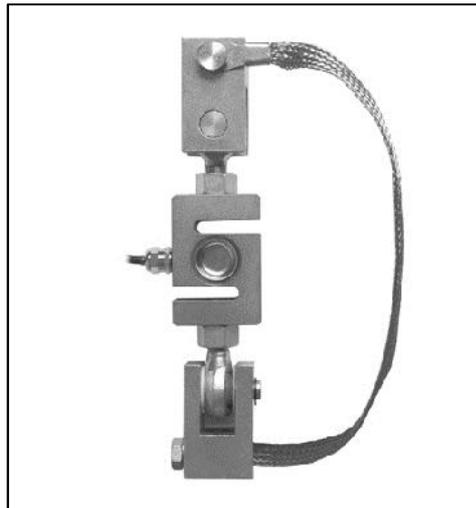


Figura 75. Celda de carga tipo S
Fuente: http://celdadecarga.com/wp-content/uploads/2015/03/anyload_101NHM1_montaje_101nh.jpg

3.3.8.2.1. Especificaciones de diseño

Según el diseño mecánico de la máquina (ver sección 2.1.2. Máquina de ensayos de fatiga tipo R. R. Moore) la máquina soporta un peso de hasta 50 kg, por lo tanto la celda de carga debe tener este rango. Debido a que el

peso aplicado en el ensayo de fatiga se coloca a tracción, se implementará una celda de carga tipo s con las siguientes características:

- **Alimentación:** 24 VDC
- **Tipo de salida:** Analógica en voltaje (0 a 10 V)
- **Rango de entrada:** 0-30 kg

La máquina trabaja con un peso de hasta 50 kg, el peso base que soporta la probeta es de 14.432 kg, vale aclarar entonces que la celda de carga deberá sensar un peso máximo de 35.568 kg; sin embargo las prácticas en el laboratorio se hacen con un peso aproximado de 25 kg incluyendo el peso base, por tal motivo se optó por una celda de carga con capacidad de 30 kg. Si se desea realizar prácticas con un peso de sensado mayor a 30 kg lo que resultaría que la probeta soporte un peso de 44.432 kg, se debe aplicar el pistón hidráulico, para verificar estas características mecánicas leer sección 3.1.1. Funcionamiento de la máquina y sección 2.1.2. Máquina de ensayos de fatiga tipo R. R. Moore, donde se establece que la máquina soporta hasta 300 kg.

- **Sensibilidad:** 333.33 mV/kg

La celda de carga debe tener la capacidad de responder con un máximo de 10 V cuando sense el valor nominal que es 30 kg de peso, y responder con 0 V cuando sense 0 kg, por lo tanto el sensor debe tener una respuesta lineal con sensibilidad máxima de 333.33 mV/kg.

Para determinar si el sensor puede comunicarse con el PLC que se implementará, se parte del hecho que la entrada analógica del PLC tiene un rango de 0 a 10 V con convertidor análogo digital de 10 bits de resolución (ver tabla 21), entonces se aplica la fórmula:

$$\Delta V = V_R \cdot 2^{-n}$$

donde: ΔV : sensibilidad del sensor
 V_R : voltaje referencial (voltaje máximo de sensado)

n : resolución del convertidor análogo digital
del PLC en bits

Y se despeja la sensibilidad mínima que debe tener el sensor para que pueda comunicarse con el PLC:

$$\Delta V = 10 \cdot 2^{-10}$$

$$V = 9.7656 \cdot 10^{-3} \text{ V/kg}$$

$$V \cong 10 \text{ mV/kg}$$

En conclusión una celda de carga con sensibilidad de 333.33 mV/kg trabaja correctamente con el PLC que se implementará ya que éste soporta una sensibilidad mínima de 10 mV/kg.

- **Resolución:** 0.5 kg

La celda de carga debe tener la capacidad de sensar incrementos mínimos de 0.5 kg que es el valor de las pesas que cuenta el laboratorio de Mecánica de Materiales. Se informa que el portapesas de la máquina tiene un peso de 18.512 kg, sin embargo se redondeará en 18.5 kg.

En vista de estas especificaciones requeridas y considerando que en el mercado ecuatoriano los precios son muy elevados para este tipo de dispositivos, se buscó una celda de carga en el extranjero en una plataforma virtual de compra en línea; sus especificaciones se detallan en la figura 76:

Product Description

Size: 30KG

Note: The color of the item may vary slightly due to photography and your own computer

Description

The item is made of alloy steel, hermetically welded/sealed by adhesive inside, oil-proof, waterproof and anti-corrosion. Safe and anti-explosive product, can be used in atrocious environment and hazardous areas. It is suitable for crane scale, mechanical conversion scale, hopper scale and other electronic weighing devices. S beam design, tension and/or compression loading possible, easy installation

Sensitivity: $2.0 \pm 0.05 \text{ mV/V}$
 Nonlinear: $\pm 0.03 \leq \% \text{ F.S}$
 Hysteresis: $\pm 0.03 \leq \% \text{ F.S}$
 Zero output: $\pm 1 \leq \% \text{ F.S}$
 Output resistance: $350 \pm 5 \text{ m}$
 Insulation resistance: More than 5000 megohm (50VDC)
 Input resistance: $365 \pm 20 \text{ ohm}$
 Excitation voltage: 10V-15V
 Size: 3x0.75x2inch

Connection mode:
 red: power supply +, black: power -, green: signal + white: signal -

Package Included:
 1x Load cell

Figura 76. Especificaciones técnicas celda de carga

Fuente: https://www.amazon.com/Pressure-Force-S-type-Sensor-500KG1T/dp/B01F6IOWDG/ref=pd_sbs_328_7?ie=UTF8&pd_rd_i=B01F6IOW9K&pd_rd_r=XX7VM0RVWXKQVC5ZBBYB&pd_rd_w=UNuv&pd_rd_wg=mmD3Z&refRID=XX7VM0RVWXKQVC5ZBBYB&th=1

Los parámetros de la celda de carga que se aprecian en la figura 76 hablan de una sensibilidad de 2 mV/V , lo que significa que tendrá una respuesta máxima de 2 mV por cada voltio de alimentación; en este proyecto la celda se alimentará con 12 VDC (ver sección 4.2.8.3. Acondicionamiento celda de carga) por lo que tendrá una respuesta de salida máxima de 24 mV , lo que significa que al sensar 30 kg , la celda responderá con 24 mV de salida; en términos de sensibilidad, el sensor será de 1.25 mV/kg . Como esta respuesta es demasiado baja respecto a la sensibilidad mínima calculada que debe tener el sensor, la cual es de 10 mV/kg , es preciso implementar una etapa de amplificación descrita en la sección 3.3.8.3.

3.3.8.3. Acondicionamiento celda de carga

Para ilustrar el proceso de acondicionamiento de la señal analógica que entrega una celda de carga se utilizará el siguiente esquema.

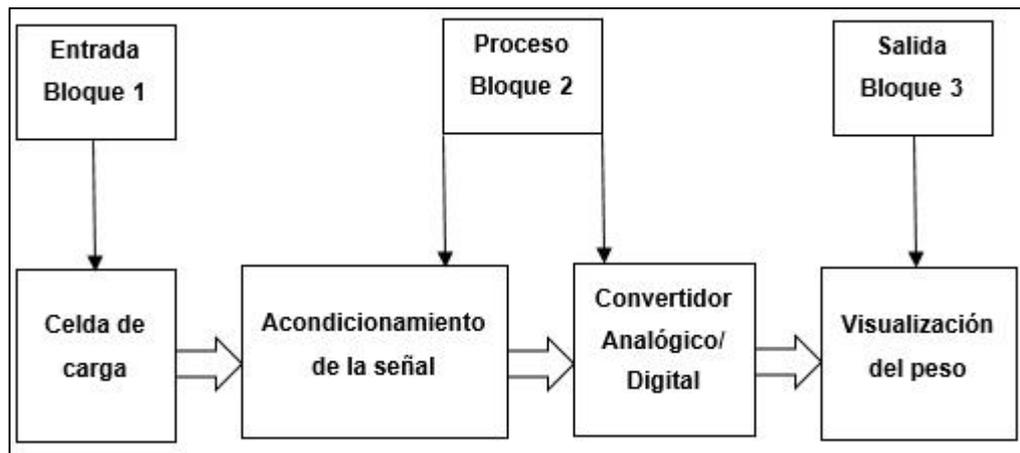


Figura 77. Fases para acondicionamiento de una señal

3.3.8.3.1. Bloque 1

Como ya se mencionó anteriormente la celda de carga seleccionada es una celda tipo S cuyas especificaciones técnicas se encuentran en la figura 76

3.3.8.3.2. Bloque 2

Acondicionamiento de señal: el acondicionamiento de una señal se refiere a la modificación de la misma para que esta pueda llegar de forma adecuada a la siguiente etapa de operación. Dentro de las modificaciones de las señales están pueden ser amplificadas, filtradas, linealizada, etc.

Para el caso de la celda de carga la señal que esta entrega está en el orden de los milivoltios y necesita ser amplificada en un rango de 0 a 10V que es el rango que admite el PLC y filtrada para su posterior conversión digital.

$$Señal = \frac{Carga(Kg) * Sensibilidad(V/V) * Voltaje excitación(V)}{Capacidad celda (Kg)}$$

Ahora, si tenemos por ejemplo una masa de 0.5 Kg, la señal que se obtendrá y se debe acondicionar será:

$$Señal = \frac{0.5 * 0.002 * 12}{30}$$

$$\text{Señal} = 0.4\text{mV}$$

La celda de carga tipo S presenta la siguiente disposición interna de sus galgas extensiométricas por lo cual esta no debe pasar previamente por un circuito tipo puente de Wheatstone antes de amplificarse la señal.

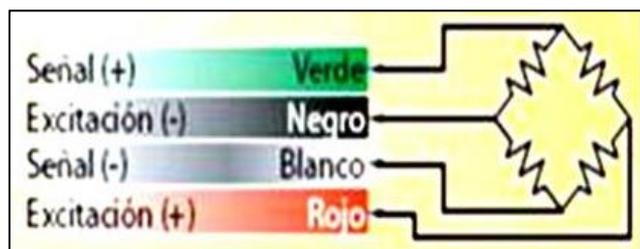


Figura 78. Disposición de galgas extensiométricas

Fuente: http://balanzas.yoreparo.com/balanzas_y_registradoras/ayuda-urgente-con-bascula-rhino-t1539636.html

Como se puede observar en la figura 78, la diferencia de potencial que exista entre los terminales verde y blanco es la que se amplificará llegando al rango de lectura del PLC antes mencionado, para este fin se utilizará el amplificador de instrumentación AD620 cuya hoja técnica se muestra en anexos.

Amplificador de instrumentación AD620

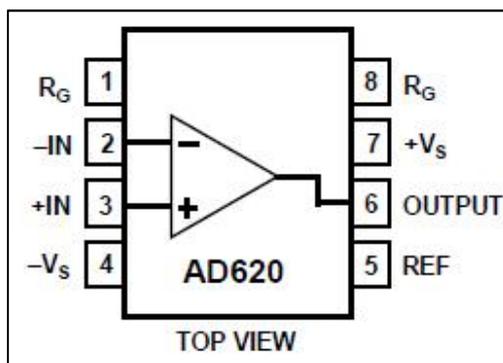


Figura 79. Diagrama de conexión

Fuente: Analog Devices, Manual de usuario, introducción, diagrama de Conexión, Modelo de amplificador AD620

El AD620 es un amplificador de instrumentación de alta precisión que requiere sólo una resistencia externa (R_G) que para el caso se utilizará un

potenciómetro que servirá para ajustar ganancias de 1 a 10.000 que obedece a la siguiente relación:

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

Donde:

Rg: Resistencia de ganancia

G: Ganancia

El AD620, con su alta precisión de 40 ppm de no linealidad máxima, baja tensión de offset de 50 μV máx. Y desviación de offset de 0,6 $\mu\text{V} / ^\circ \text{C}$ máx, es ideal para sistemas de adquisición de datos de precisión, como básculas de pesaje e interfaces de transductores. Además, el bajo nivel de ruido, la baja corriente de polarización de entrada y la baja potencia del AD620 lo hacen muy adecuado para aplicaciones médicas, como ECG y monitores de presión arterial no invasiva. (Analog Devices , 2014)

Luego de amplificar la señal esta será montada sobre una señal de voltaje constante generado por un divisor de tensión, dicha señal se podrá setear a través de un segundo potenciómetro (RV2) que se muestra en la figura 80 y de esta manera se podrá indicar a partir de que valor iniciará el voltaje mas bajo, para el caso este será seteado en 1V luego ambas señales ingresar a un segundo amplificador operacional en configuración de sumador, luego ingresará a otro amplificador en configuración de seguidor de voltaje con el objetivo de acoplar las impedancias de la celda con el PLC y la señal no se vea afectada.

Como precaución ante tensiones parásitas se colocó un capacitor de 10 μF y un circuito de protección con diodos, uno en serie para sobre corrientes y un segundo diodo zener de 10V en paralelo para impedir que se generen voltaje sobre la cantidad mencionada que afecten al PLC.

Finalmente el diseño de circuito propuesto es el que se muestra a continuación.

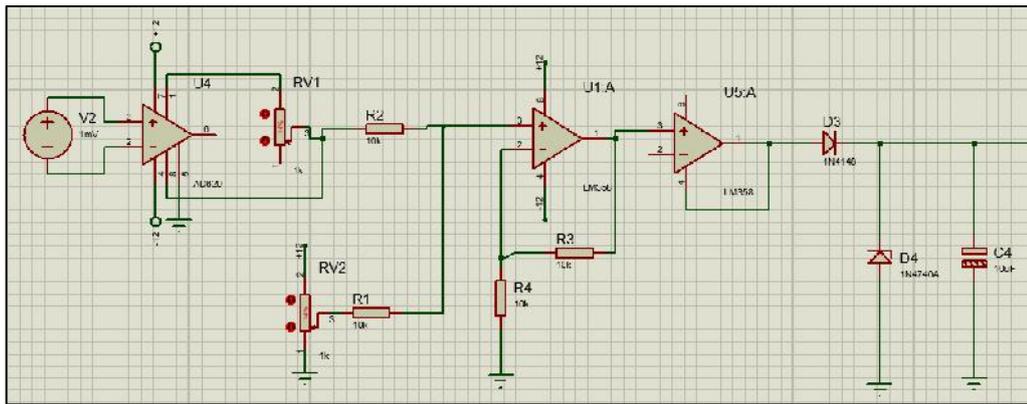


Figura 80. Circuito de acondicionamiento

3.3.8.4. Encoder

El encoder se acoplará al motor con el fin de determinar el número de revoluciones que gire el motor mientras se lleve a cabo un ensayo de fatiga en la máquina. Un encoder es un dispositivo electromecánico utilizado para traducir la posición angular de un eje a un código digital.



Figura 81. Encoder rotacional

Fuente: https://http2.mlstatic.com/S_265811-MEC20647669429_032016-O.jpg

Existen dos tipos de encoder según el código digital que generan, los cuales son:

Encoder incremental: Los codificadores incrementales generan pulsos a una frecuencia proporcional a la velocidad de rotación del elemento que se encuentre sensando, estos pueden utilizarse en aplicaciones de control de velocidad, control de posición o como un indicador de rotación o un generador de pulsos de servomotores montados en máquinas herramienta, robots o equipos de medición.

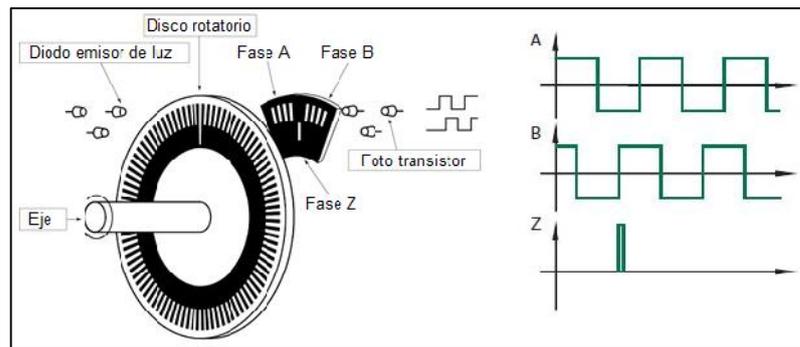


Figura 82. Estructura simplificada de un encoder incremental

Fuente: <http://www.tamagawa-seiki.com/english/encoder/rotary01.jpg>, modificada por los autores

Encoder absoluto: Los codificadores absolutos emiten el valor absoluto de los ángulos de rotación, estos codificadores se utilizan en aplicaciones como control de posición de servomotores montados en máquinas herramientas o robots, las ranuras del disco rotatorio están alineadas desde el centro en círculos concéntricos. Las aberturas generan cadenas de código binario de 2 pulsos/rev desde el centro. Los codificadores absolutos de vuelta múltiple memorizan los datos de la cantidad de rotación en una rotación.

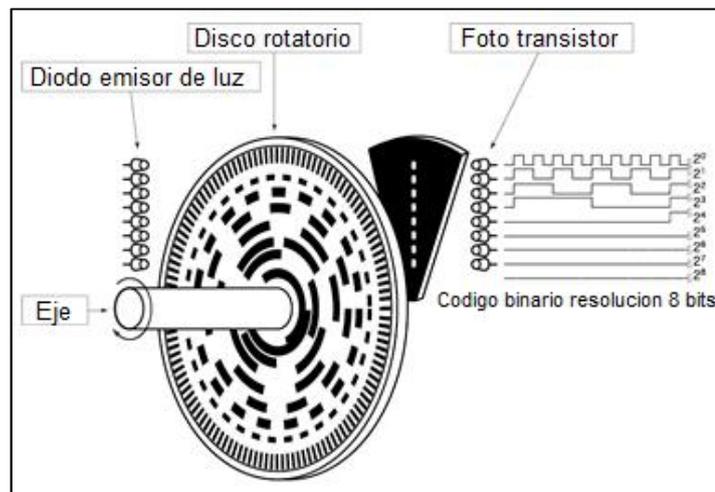


Figura 83. Estructura simplificada encoder absoluto

Fuente: <http://www.tamagawa-seiki.com/english/encoder/rotary02.jpg>

3.3.8.4.1. Especificaciones de diseño

Para este proyecto se prevé implementar un encoder incremental con las siguientes características:

- **Alimentación:** 24 VDC
- **Tipo de sensor:** Incremental

Los encoder incrementales tienen la cualidad de hacer un conteo de pulsos al girar, razón por la cual será útil en este proyecto para conocer el número de revoluciones que gira el motor durante un ensayo de fatiga; además son los más populares del mercado.

- **Respuesta:** No menor de 200 pulsos por revolución

Mientras se generen más pulsos por revolución, la lectura de velocidad y conteo de revoluciones del motor será más exacta.

De acuerdo a estas especificaciones requeridas y considerando que en el mercado ecuatoriano los precios son muy elevados para este tipo de dispositivos, se buscó un encoder en el extranjero en una plataforma virtual; sus especificaciones se detallan en la figura 84 que es una captura de pantalla de dicha plataforma virtual de compra en línea.

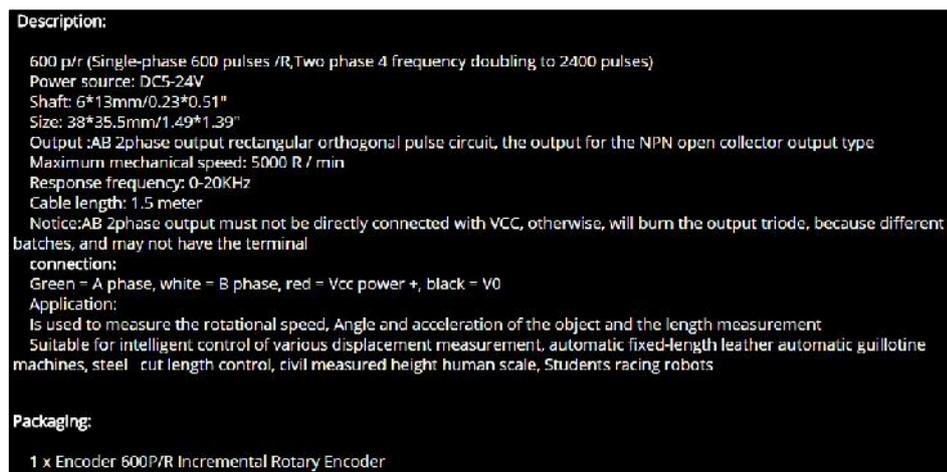


Figura 84. Especificaciones técnicas encoder

Fuente: <http://www.i3dinno.com/encoder-600-p-r-5v-24v-incremental-rotary-ab-2-p-f180598.html#savoirplus>

3.4. Diseño de los componentes del sistema de control

Los componentes del sistema de control que se implementará en la máquina constituirán una red industrial.

3.4.1. Red industrial

El objetivo principal de este proyecto es la implementación de un sistema de control que permita la automatización de la máquina de ensayos de fatiga, para ello se implementarán dispositivos que compondrán una red industrial de arquitectura maestro-esclavo, estos dispositivos son:

- **Pantalla Táctil HMI:** Actuará como el maestro de esta red así que estará en la estación 0, tendrá acceso a todos los dispositivos de la red.
- **Variador de Frecuencia (VDF):** Actuará como esclavo en esta red y se le asignará la estación 1.
- **PLC:** Actuará como esclavo en esta red localizado en la estación 2.

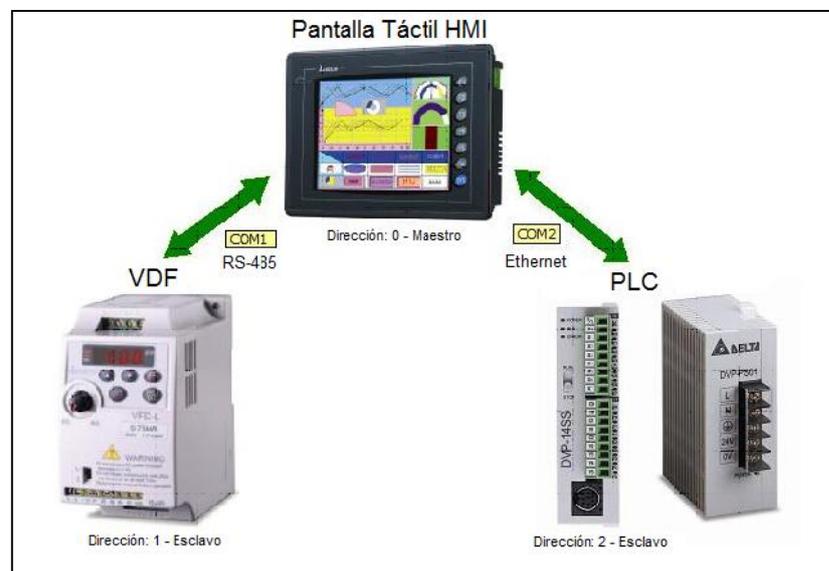


Figura 85. Red industrial propuesta

Fuente: http://www.infopl.net/files/imagenes/descargas/delta/216_01.jpg, modificada por los autores

3.4.1.1. Pantalla táctil HMI

Una interfaz humano-máquina (HMI por sus siglas en inglés) es el medio que tiene el operador para interactuar con una o varias máquinas que desempeñan determinados procesos dentro de una industria. Esta interacción consiste en primer lugar en comandar la máquina o proceso a través de pulsadores, selectores, controles eléctricos; y en segundo lugar monitorear esta máquina o proceso mediante la visualización de sus variables y resultados, esta monitorización es posible gracias a indicadores eléctricos o luces piloto, indicadores analógicos, sensores y actuadores.

En la actualidad es imprescindible todavía la utilización de estos componentes pero se han desarrollado dispositivos más poderosos para diseñar e implementar interfaces humano-máquina, entre ellos las pantallas táctiles.



Figura 86. Pantalla táctil HMI

Fuente: http://www.automationdirect.com/images/overviews/ea9-c-more_panel_300.jpg

En estas pantallas se diseñan e implementan una interfaz humano-máquina a través de un software; el diseñador programa este software para desarrollar la HMI, así que se pueden crear pulsadores, selectores, indicadores analógicos, luces piloto, etc. de manera virtual. Permiten el control de uno o varios controladores, valga la redundancia, como por ejemplo variadores de frecuencia o PLC, gracias a ello se puede dar lectura de sensores en tiempo real y mostrarla a manera de curvas históricas. La característica más interesante de estas pantallas es que son táctiles, por ello

la gran versatilidad y ergonomía para programar HMI con pulsadores y selectores y operarlos utilizando únicamente las manos.

3.4.1.1.1. Especificaciones de diseño

La pantalla será el maestro de la red industrial por lo tanto se posicionará en el nodo o estación 0, la comunicación con el variador de frecuencia se realizará mediante RS-485 empleando el protocolo Modbus RTU y con el PLC a través de Ethernet (ver sección 3.3.6.2. cableado de comunicación) empleando el protocolo Profinet; por ello el dispositivo debe tener dos puertos de comunicación, uno RS-485 y otro Ethernet.

En este dispositivo se programará la HMI que permitirá al operador controlar el proceso además de monitorear las variables y resultados del mismo; por esta razón deberá estar instalado en un lugar accesible al usuario, así que se colocará en la tapa frontal de la caja de control y ésta a su vez sobre un soporte haciendo que la pantalla se posicione a una altura de 1.60 m del suelo (ver sección 3.2.2. Soporte para caja de control). Se dispone que la pantalla tenga las siguientes características:

- **Alimentación eléctrica:** 24 VDC
- **Comunicación:** 2 puertos:
 - RS-485
 - Ethernet
- **Pantalla:** Preferiblemente a color

Dadas estas condiciones se prevé seleccionar el modelo de pantalla DOP-B03E211 cuyas especificaciones técnicas se detallan a continuación:

Tabla 18.
Especificaciones técnicas HMI

MODEL		DOP-B03S211	DOP-B03E211
TFT/Color/10.4 in	Display Type	4.3" TFT LCD (65536 colors)	
	Resolution	480 x 272 pixels	
	Backlight	LED Back Light (less than 20,000 hours half-life at 25°C) ^(Note 1)	
	Display Size	95.04 x 53.856mm	
Operation System		Delta Real Time OS	
MCU		32-bit RISC Micro-controller	
NOR Flash ROM		Flash ROM 128 MB (OS System: 30MB / Backup: 16MB / User Application: 82MB)	
SDRAM		64Mbytes	
Backup Memory		32Kbytes	
Buzzer		Multi-Tone Frequency (2K ~ 4K Hz) / 85dB	
USB		1 USB Slave Ver 2.0 1 USB Host Ver 1.1	
Serial COM Port	COM1	RS-232(supports hardware flow control) / RS-485	
	COM2	RS-422/RS-485	
Ethernet Interface		N/A	10M/100M
Perpetual Calendar		Built-in	
Cooling Method		Natural air circulation	
Safety Approval		CE / UL ^(Note 3)	
Waterproof Degree		IP65 / NEMA4 ^(Note 3)	
Operation Voltage ^(Note 2)		DC +24V (-10% ~ +15%) (please use Isolated power supply)	
Voltage Endurance		AC500V for 1 minute (between charging (DC24V terminal) and FG terminals)	
Power Consumption ^(Note 2)		4.8W	7.2W
Backup Battery		3V lithium battery CR2032 x 1	
Backup Battery Life		It depends on the temperature used and the conditions of usage, about 3 years or more at 25°C.	
Operation Temperature		0°C ~ 50°C	
Storage Temperature		-20°C ~ +60°C	
Ambient Humidity		10% ~ 90% RH [0 ~ 40°C], 10% ~ 55% RH [41 ~ 50°C], Pollution Degree 2	
Vibration		IEC 61131-2 compliant 5Hz;f < 8.3Hz = Continuous: 3.5mm, 8.3Hz;f ₀ 150Hz = Continuous: 1.0g	
Shock		IEC 60068-2-27 compliant 15g peak for 11 ms duration, X, Y, Z directions for 6 times	
Dimensions (W) x (H) x (D) mm		129 x103 x 39	
Panel Cutout (W) x (H) mm		118.8 x 92.8	
Weight		Approx. 230g	Approx. 254g

 **NOTE**

1) The half-life of backlight is defined as original luminance being reduced by 50% when the maximum driving current is supplied to HMI. The life of LED backlight shown here is an estimated value under 25°C normal temperature and humidity conditions.

2) The value of the power consumption indicates the electrical power consumed by HMI only without connecting to any peripheral devices. In order to ensure the normal operation, it is recommended to use a power supply which the capacity is 1.5 ~2 times the value of the power consumption.

3) Some models are in the process of application to certification. For more information, please consult our distributors.

4) The content of this instruction sheet may be revised without prior notice. Please consult our distributors or download the most updated version at <http://www.delta.com.tw/ai/>.

Fuente: Delta, DOP-B03 DOPB03S211/B03E211 Instruncion Sheet, sección especificaciones

3.4.1.2. Variador de frecuencia (VDF)

Un variador de frecuencia es un sistema que permite el control de motores trifásicos de inducción y además los protege de una sobrecarga, cortocircuito, sobretensión y/o baja tensión (LS, Manual de usuario SV-iE5,

capítulo especificaciones, sección funciones protectivas) sin necesidad de instalar dispositivos adicionales como guardamotores. Internamente cuenta con dispositivos de estado sólido para transformar energía eléctrica, concretamente un convertidor AC/DC y otro DC/AC, llamados rectificador e inversor respectivamente; estos dispositivos al ser elementos de potencia disipan una considerable cantidad de calor que se debe tomar muy en cuenta para su instalación (ver sección 3.2.1. Caja de control, figura 32).

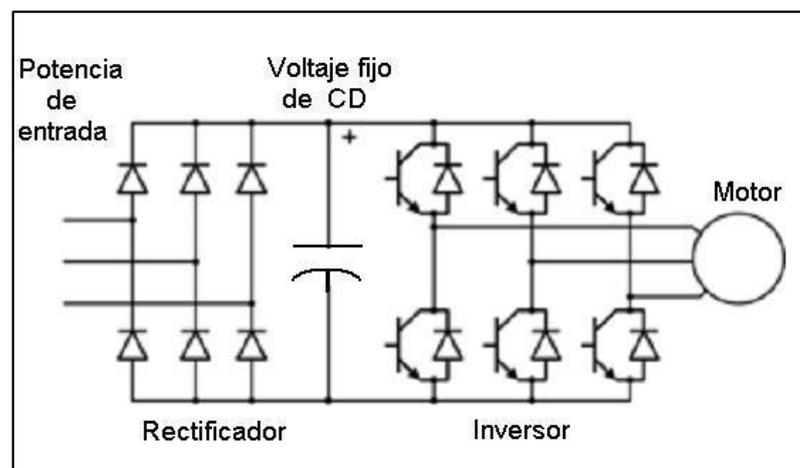


Figura 87. Diagrama eléctrico de un variador de frecuencia

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Diagrama_variador_de_frecuencia.JPG

La característica del VDF que permite regular la velocidad de un motor es la capacidad de éste para variar su frecuencia de salida que será enviada al motor. Se recuerda que la velocidad de un motor de inducción depende de la siguiente ecuación:

$$N = 60 \frac{2f}{p}$$

donde: N : velocidad en RPM
 f : frecuencia de alimentación en Hz
 p : número de polos del motor

En general el funcionamiento del VDF es rectificar la señal de corriente alterna que recibe de la red eléctrica pública, que en nuestro país es de 60 Hz, para poder ser controlada, de esta forma se puede invertir esta señal con una frecuencia variable que el operador escoge, típicamente de 0 a 200 Hz según el modelo de VDF. En la figura 88 se puede apreciar este proceso.

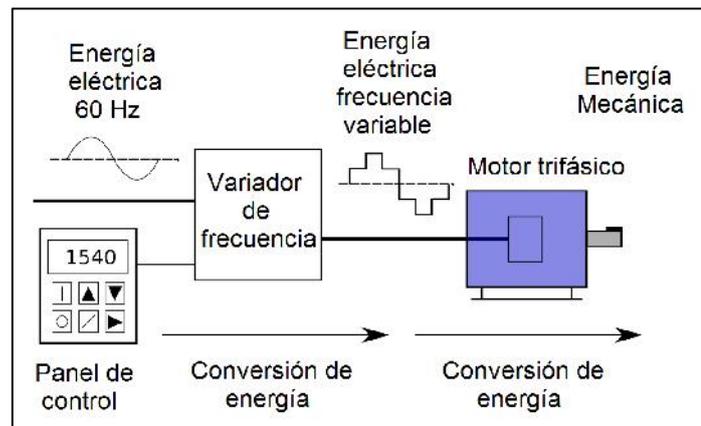


Figura 88. Entrada y salida de un variador de frecuencia

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f2/VFD_System_svg.svg/2000px-VFD_System_svg.svg.png, modificada por los autores

El variador de frecuencia puede ejercer tres tipos de control sobre un motor:

1. Control escalar v/f
2. Control escalar Mejorado
3. Control vectorial

Control escalar v/f: Se trata de un control en lazo abierto, de esta forma el variador de frecuencia regula la velocidad variando su frecuencia de salida; aunque no exista un transductor que verifique la velocidad del motor, este control es bastante exacto y preciso.

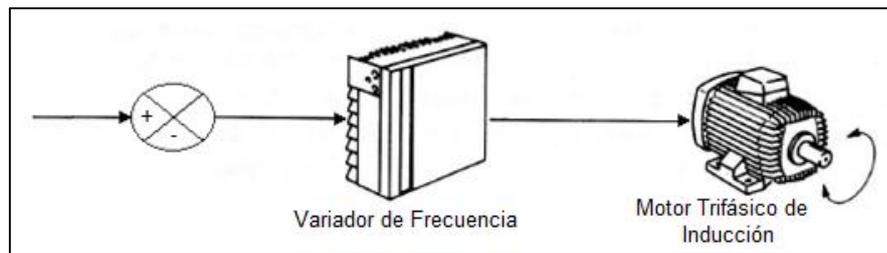


Figura 89. Diagrama de un Control Escalar V/F

Control escalar mejorado: Al igual que el anterior se trata de un control en lazo abierto pero en este caso el variador de frecuencia ejerce una compensación de torque para frecuencias bajas. Generalmente se da el caso de que al trabajar con frecuencias bajas y dependiendo de la carga, el motor no tenga el torque necesario para girar, por lo tanto el variador de frecuencia compensa el torque suministrando más voltaje al motor.

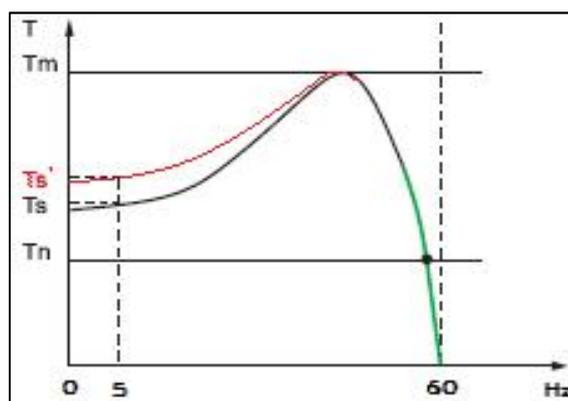


Figura 90. Curva frecuencia vs torque

Como se observa en la figura 90, T_s es el valor de torque que tiene el motor trabajando a una frecuencia de 5 Hz y se puede aumentar este torque a un valor T_s' trabajando a la misma frecuencia, esto es lo que se logra con este tipo de control cuya compensación de torque es regulable hasta en un 15 por ciento en la mayoría de variadores de frecuencia del mercado.

Control vectorial: Este control es en lazo cerrado de tipo PI, proporcional integrativo; en este caso el variador de frecuencia establece su frecuencia de salida de acuerdo a la información que reciba de un sensor, como por ejemplo un transductor de presión en un sistema de bombeo.

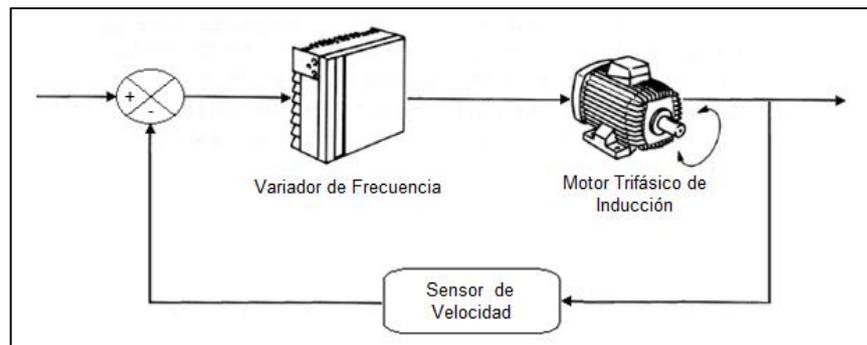


Figura 91. Diagrama control vectorial

Esta característica presentan solo algunos modelos de variadores de frecuencia con la finalidad de optimizar el uso de energía, para el ejemplo del sistema de bombeo que requerirá siempre una presión constante, a ciertas horas del día el variador deberá trabajar al máximo operando todas las bombas del sistema mientras que en otras horas del día no se requerirá demasiado trabajo, pero siempre el sistema deberá tener una presión constante de agua, entonces se programa el variador de frecuencia en modo control vectorial para lograr mantener la presión constante.

El variador de frecuencia tiene tres mecanismos de operación, puede ser comandado mediante:

- Teclado del panel de control
- Entradas analógicas y digitales
- Comunicación con otro dispositivo inteligente



Figura 92. Panel de control VDF



Figura 93. Módulo de entradas VDF

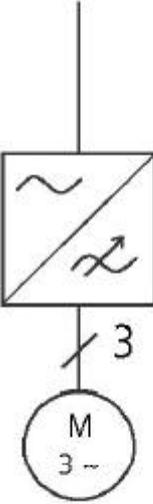
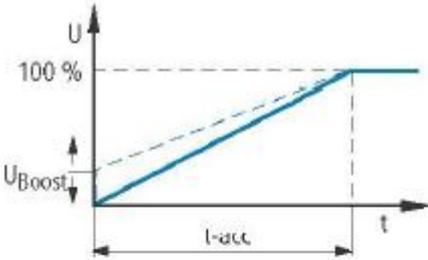


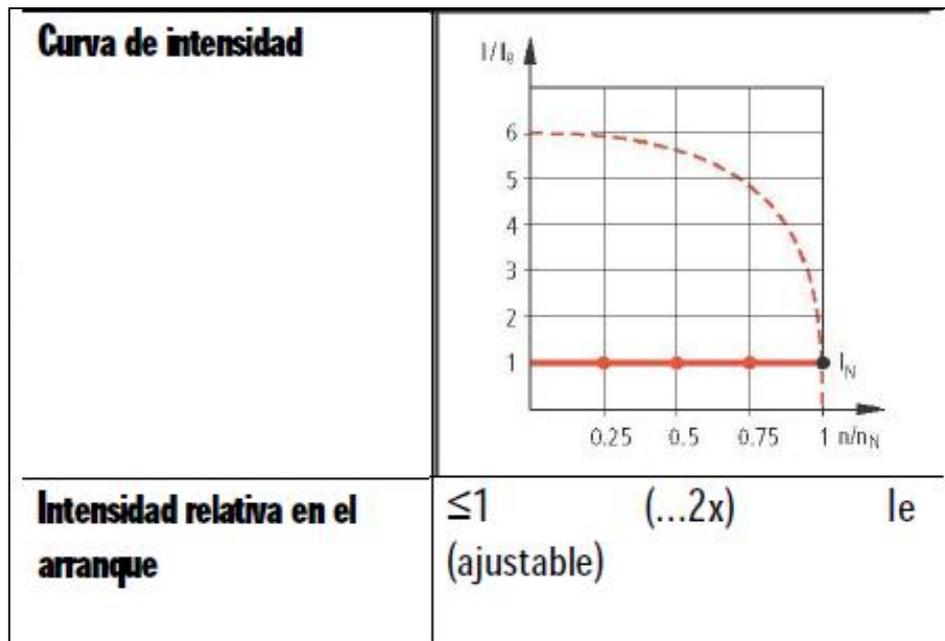
Figura 94. Comunicación de un dispositivo inteligente (PLC) con tres variadores de frecuencia

Fuente: http://www.infopl.net/files/imagenes/descargas/omron/2271_00.jpg

Otra gran ventaja que presentan los variadores de frecuencia es el arranque suave que hace en los motores, bajando considerablemente la corriente de arranque, según la tabla 19, la corriente de arranque de un motor controlado por un variador de frecuencia no excede el valor de la corriente nominal.

Tabla 19.
Parámetros de un motor controlado por VDF

	Convertidor de frecuencia
Diagrama	
Curva de tensión	
Carga en la red en el arranque	Bajo



Fuente: EATON, Arranque y control de motores trifásicos asíncronos, sección convertidores de frecuencia

3.4.1.2.1. Especificaciones de diseño

Para este proyecto el variador de frecuencia se controlará mediante la comunicación con otro dispositivo inteligente ya que se logra un mayor grado de automatización, de esta forma el VDF será comandado mediante la pantalla táctil HMI y la comunicación será por medio de cable RS-485 (ver sección 3.4.1.) con un protocolo Modbus RTU. Por lo tanto se proyecta implementar un variador de frecuencia con las siguientes características:

- **Alimentación eléctrica:** 220 V 3Ø, 60 Hz
- **Potencia:** 1/2 HP

Este parámetro depende de la potencia del motor que se va a controlar, para un motor de 1/2 HP se requerirá un variador de 1/2 HP. En el caso de que no se disponga de una alimentación trifásica, se sugiere intentar alimentar el variador con 220 VAC, es decir 220 voltios monofásicos, sin embargo se deberá sobredimensionar el parámetro de potencia comercial más o menos al doble, por ejemplo en este caso se controlará un motor de 1/2 HP, si el variador se alimentará con 220 VAC, éste deberá ser de 3/4 HP o 1 HP.

- **Comunicación:** RS-485

- **Tipo de control:** Escalar v/f y escalar mejorado

Los variadores de frecuencia presentan tres tipos de control como se detalló anteriormente, escalar, escalar mejorado y vectorial; para este proyecto no se requerirá de un control vectorial así que se implementará un variador que prescindiera de control vectorial, significando un ahorro económico. Los fabricantes producen dos versiones, una incorporando los tres tipos de control y otra incorporando únicamente el control escalar y escalar mejorado.

Dadas estas condiciones se estima seleccionar el modelo de variador SV 004 iE5-2 cuyas especificaciones técnicas se detallan a continuación:

Tabla 20.
Especificaciones técnicas variador de frecuencia

● Valores de salida y entrada							
Tipo : SV xxx iE5 – x		001-1	002-1	004-1	001-2	002-2	004-2
¹⁾ Motor	[HP]	1/8	1/4	1/2	1/8	1/4	1/2
	[kW]	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4
Valores de salida	²⁾ Capacidad(kVA)	0.3	0.6	0.95	0.3	0.6	1.14
	Corriente [A]	0.8	1.4	2.5	0.8	1.6	3.0
	Frecuencia de salida	0 ~ 200 [Hz]					
	Tensión [V]	³⁾ 3fases 200 ~ 230V					
Valores de entrada	Tensión [V]	1fase 200 ~ 230 VAC (±10%)			3fases 200~230 VAC (±10%)		
	Frecuencia	50 ~ 60 [Hz] (±5%)					
	Corriente[A]	2.0	3.5	5.5	1.2	2.0	3.5
● Control							
Método de control		v/f					
Sistema COM		RS-485					

Fuente: LS, Manual de Usuario SV-iE5, capítulo Especificaciones, sección Especificaciones técnicas y capítulo opción de comunicación, sección opción COM (RS-485)

3.4.1.3. PLC

El programmable logic controller (PLC) que se traduce del inglés a controlador lógico programable, constituye una de las herramientas más

poderosas en el campo de la automatización por su capacidad de controlar otros dispositivos eléctricos y electrónicos tales como electroválvulas, motores, variadores de frecuencia, en fin; interpretar señales emitidas por sensores tanto analógicas como digitales; y su habilidad de comunicarse a otros dispositivos inteligentes como una pantalla táctil HMI para formar una compleja red de automatización industrial.

La automatización llevada a cabo mediante un PLC se hace mucho más flexible por su cualidad de ser programable, ya que mediante su amplio juego de instrucciones se pueden crear elementos eléctricos tales como relés, temporizadores, contadores de manera virtual, optimizando las conexiones eléctricas en un proyecto de control industrial.



Figura 95. Controlador lógico programable

Fuente: Siemens S7-1200, Manual de usuario

La CPU de los PLC generalmente se compone de un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada, circuitos de salida y puertos de comunicación, esta disposición entra en la categoría de *PLC compacto* (Siemens, Simatic S7 Controlador programable Manual de sistema). Existe también la categoría de *PLC modular* en la que cada componente del PLC se dispone en módulos separados.

3.4.1.3.1. Especificaciones de diseño

En este proyecto se requiere de un PLC para hacer una adquisición de datos en tiempo real de los valores que sense la celda de carga (sección 3.3.8.2) por ello la importancia de implementar un PLC con entradas analógicas de alta resolución; el PLC dará lectura de la señales emitidas por la celda de carga y el sensor de distancia (sección 3.3.8.1) y las enviará a la pantalla táctil HMI a fin de que ésta las reproduzca en forma de curvas o indicadores alfanuméricos; por lo tanto el PLC debe tener un puerto de comunicación Ethernet. Además el PLC deberá procesar la información proveniente del encoder para mostrar en la pantalla HMI la velocidad real a la que gira el motor y el número de revoluciones o ciclos que se producen en el ensayo (sección 3.3.8.4) por lo que debe tener respuesta a entradas de alta frecuencia; el PLC también captará la señal del pulsador de emergencia y enviará una señal al variador de frecuencia para que detenga el motor (sección 3.3.1); por último hará funcionar a los indicadores eléctricos o luces piloto (sección 3.3.4.). En consecuencia el PLC debe reunir las siguientes características:

- **Alimentación:** 220 VAC
- **Entradas digitales:** 4
 - Pulsador de emergencia
 - Sensor de distancia
 - Fase A encoder (ver sección 3.3.8.4.)
 - Fase B encoder (ver sección 3.3.8.4.)
- **Salidas digitales:** 2
 - Indicador eléctrico o luz piloto verde
 - Indicador eléctrico o luz piloto roja
- **Entradas analógicas:** 1 en voltaje (0 a 10 V)
 - Celda de carga
- **Resolución:** 5 bits

La resolución se calcula mediante la fórmula:

$$\Delta V = V_R \cdot 2^{-n}$$

Donde: ΔV : sensibilidad del sensor
 V_R : voltaje referencial (voltaje máximo de sensado)
 n : resolución del convertidor análogo digital del PLC en bits

La sensibilidad real de la celda de carga acondicionada (sección 3.3.8.3) es:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{10 V}{30 kg} = 0.333 V/kg$$

Dada esta sensibilidad, el voltaje referencial es:

$$V_R = 10 V$$

Al aplicar la fórmula descrita anteriormente se tiene:

$$0.333 = 10 \cdot 2^{-n}$$

Resolviendo se tiene la resolución del convertidor análogo digital del PLC requerida:

$$n = 4.91 \quad 5 \text{ bits}$$

Comunicación: Ethernet

Dados estos requerimientos se propone la implementación de un PLC con una CPU modelo 1211C AC/DC/relé cuyas especificaciones técnicas se detallan a continuación:

Tabla 21.
Especificaciones técnicas PLC

Datos técnicos			
Modelo	CPU 1211C AC/DC/relé	CPU 1211C DC/DC/relé	CPU 1211C DC/DC/DC
Referencia (MLFB)	6ES7 211-1BD30-0XB0	6ES7 211-1HD30-0XB0	6ES7 211-1AD30-0XB0
Velocidad de ejecución booleana	0,1 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución de transferencia de palabras	12 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución de funciones matemáticas con números reales	18 µs/instrucción		
Comunicación			
Número de puertos	1		
Tipo	Ethernet		
Conexiones	<ul style="list-style-type: none"> • 3 para HMI • 1 para la programadora • 8 para instrucciones Ethernet en el programa de usuario • 3 para CPU a CPU 		
Transferencia de datos	10/100 Mb/s		
Aislamiento (señal externa a lógica del PLC)	Aislado por transformador, 1500 V DC		
Tipo de cable	CAT5e apantallado		
Fuente de alimentación			
Rango de tensión	85 a 264 V AC	20,4 a 28,8 V DC	
Frecuencia de línea	47 a 63 Hz	--	
Intensidad de entrada CPU sólo a carga máx.	60 mA a 120 V AC 30 mA a 240 V AC	300 mA a 24 V DC	
CPU con todos los accesorios de ampliación a carga máx.	180 mA a 120 V AC 90 mA a 240 V AC	900 mA a 24 V DC	
Corriente de irrupción (máx.)	20 A a 264 V AC	12 A a 28,8 V DC	
Aislamiento (potencia de entrada a lógica)	1500 V AC	Sin aislamiento	
Corriente de fuga a tierra, línea AC a tierra funcional	0,5 mA máx.	-	
Tiempo de mantenimiento (pérdida de potencia)	20 ms a 120 V AC 80 ms a 240 V AC	10 ms a 24 V DC	
Fusible interno, no reemplazable por el usuario	3 A, 250 V, de acción lenta		
Entradas digitales			
Número de entradas	6		
Tipo	Sumidero/fuente (tipo 1 IEC sumidero)		
Tensión nominal	24 V DC a 4 mA, nominal		
Tensión continua admisible	30 V DC, máx.		
Sobretensión transitoria	35 V DC durante 0,5 seg.		
Señal 1 lógica (mín.)	15 V DC a 2,5 mA		
Señal 0 lógica (máx.)	5 V DC a 1 mA		
Aislamiento (campo a lógica)	500 V AC durante 1 minuto		
Grupos de aislamiento	1		
Tiempos de filtro	0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,2, 6,4 y 12,8 ms (seleccionable en grupos de 4)		
Frecuencias de entrada de reloj HSC (máx.) (señal 1 lógica = 15 a 26 V DC)	Fase simple: 100 KHz Fase en cuadratura: 80 KHz		
Número de entradas ON simultáneamente	6		
Longitud de cable (metros)	500 apantallado, 300 no apantallado, 50 apantallado para entradas HSC		
Entradas analógicas			
Número de entradas	2		
Tipo	Tensión (asimétrica)		
Rango	0 a 10 V		
Rango total (palabra de datos)	0 a 27648 (consulte Representación de entradas analógicas para tensión (Página 346))		

Rango de sobreimpulso (palabra de datos)	27.649 a 32.511 (consulte Representación de entradas analógicas para tensión (Página 346))	
Desbordamiento (palabra de datos)	32.512 a 32767 (consulte Representación de entradas analógicas para tensión (Página 346))	
Resolución	10 bits	
Tensión de resistencia al choque máxima	35 V DC	
Alisamiento	Ninguno, débil, medio o fuerte (consulte los tiempos de respuesta de paso en Tiempos de respuesta de las entradas analógicas (Página 346))	
Rechazo de interferencias	10, 50 ó 60 Hz (consulte las frecuencias de muestreo en Tiempos de respuesta de las entradas analógicas (Página 346))	
Impedancia	≥100 KΩ	
Aislamiento (campo a lógica)	Ninguno	
Precisión (25°C / 0 a 55°C)	3,0% / 3,5% de rango máximo	
Rechazo en modo común	40 dB, DC a 60 Hz	
Rango de señales operativo	La tensión de señal más la tensión en modo común debe ser menor que +12 V y mayor que -12 V	
Longitud de cable (metros)	10 m, par trenzado apantallado	
Salidas digitales		
Número de salidas	4	
Tipo	Relé, contacto seco	Estado sólido - MOSFET
Rango de tensión	5 a 30 V DC ó 5 a 250 V AC	20,4 a 28,8 V DC
Señal 1 lógica a intensidad máx.	--	20 V DC mín.
Señal 0 lógica con carga de 10 KΩ	--	0,1 V DC máx.
Intensidad (máx.)	2,0 A	0,5 A
Carga de lámparas	30 W DC/200 W AC	5 W
Resistencia en estado ON	Máx. 0,2 Ω (si son nuevas)	0,6 Ω máx.
Corriente de fuga por salida	--	10 µA máx.
Sobrecorriente momentánea	7 A si están cerrados los contactos	8 A durante máx. 100 ms
Protección contra sobrecargas	No	
Aislamiento (campo a lógica)	1500 V AC durante 1 minuto (bobina a contacto) Ninguno (bobina a lógica)	500 V AC durante 1 minuto
Resistencia de aislamiento	100 MΩ mín. si son nuevas	--
Aislamiento entre contactos abiertos	750 V AC durante 1 minuto	--
Grupos de aislamiento	1	1
Tensión de bloqueo inductiva	--	L+ menos 48 V DC, disipación de 1 W
Retardo de conmutación (Qa.0 a Qa.3)	10 ms máx.	1,0 µs máx., OFF a ON 3,0 µs máx., ON a OFF
Frecuencia de tren de impulsos (Qa.0 y Qa.2)	No recomendado	100 KHz máx., 2 Hz mín.
Vida útil mecánica (sin carga)	10.000.000 ciclos abiertos/cerrados	--
Vida útil de los contactos bajo carga nominal	100.000 ciclos abiertos/cerrados	--
Reacción al cambiar de RUN a STOP	Último valor o valor sustitutivo (valor predeterminado: 0)	
Número de salidas ON simultáneamente	4	
Longitud de cable (metros)	500 apantallado, 150 no apantallado	

Fuente: Siemens, Simatic S7 Controlador programable S7-1200 Manual de sistema, sección datos técnicos de la CPU 1211C

3.4.2. Selección de sistema de control

El sistema de automatización que se implementará en la máquina, en realidad ejecutará dos procesos que requieren de un sistema de control, estos procesos son:

- Arranque y regulación de la velocidad del motor
- Detención de la máquina al finalizar el ensayo

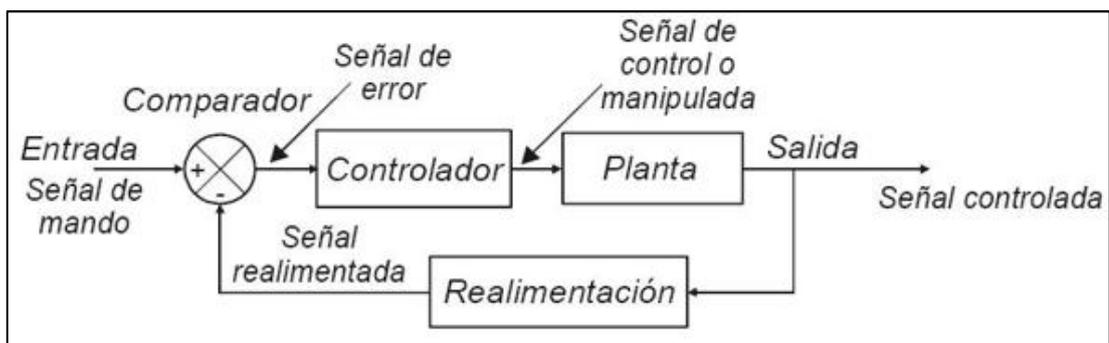


Figura 96. Diagrama de un sistema de control clásico

Fuente: <http://1.bp.blogspot.com/-DDzVWFJBT80/T3cjhznPZZI/AAAAAAAAAB-k/I32WWPTA3jl/s1600/tec06.jpg>

3.4.2.1. Control de arranque y velocidad del motor

El sistema de control actuará sobre el motor que es el responsable directo del proceso llevado a cabo por la máquina, se recuerda que este proceso es el ensayo de fatiga de materiales a través de probetas metálicas principalmente, explicado con anterioridad (sección 3.1.1. Funcionamiento de la máquina).

Se ha llegado a la conclusión de que un motor trifásico de inducción es más sencillo y económico de controlar que el motor monofásico de inducción que se encuentra actualmente en la máquina así que se hará este reemplazo en la máquina (revisar matriz de selección en la sección 3.1.2.4).

Para diseñar el sistema de control se definirán las características técnicas del motor que actuará como la planta, se seleccionará un controlador económicamente viable y se decidirá sobre la realimentación o también llamada retroalimentación, en el caso de incorporarla al sistema se

detallarán las especificaciones eléctricas de los sensores que constituyen esta realimentación.

3.4.2.1.1. Planta: motor trifásico de inducción

En ingeniería de control la definición de planta afirma que es cualquier objeto físico que se va a controlar, y este puede ser una pieza, una parte o conjunto de partes de una máquina que ejecutan una operación particular (Ogata, 1998). Para referencia de este dispositivo dirigirse a la sección 3.3.1.

3.4.2.1.2. Controlador: HMI-VDF

El controlador consta de la pantalla táctil HMI y el variador de frecuencia comunicados entre sí por medio de RS-485 empleando el protocolo de comunicación serial Modbus RTU.

Pantalla táctil HMI: A través de esta pantalla el operador ejecutará el ensayo de fatiga, pondrá en funcionamiento la máquina estableciendo previamente la velocidad del motor. Adicionalmente con ayuda del PLC mostrará datos del proceso como el número de ciclos o revoluciones que dé el motor muy importante en un ensayo de fatiga, además se observará la curva del esfuerzo flector en función del tiempo. Para referencia de este dispositivo dirigirse a la sección 3.4.1.1.

Variador de frecuencia (VDF): Para el control de velocidad del motor en este proyecto, no se requiere mayor exactitud y precisión por lo que bastará un control escalar que es en lazo abierto, quizá se necesite de un control escalar mejorado para tener una compensación en torque cuando se aplique elevada carga al motor y éste se active con bajas velocidades (leer sección 3.4.1.2); por lo tanto se implementará un variador de frecuencia únicamente con control escalar y control escalar mejorado prescindiendo de un variador con control vectorial, por supuesto esto implicará también un ahorro económico. Para referencia de este dispositivo dirigirse a la sección 3.4.1.2.

3.4.2.1.3. Realimentación

La realimentación de un sistema de control es la medición de su señal de salida a través de un sensor para corroborar la ejecución del controlador. En este caso la señal de salida es la velocidad del motor que dadas las prestaciones del controlador, se puede regular sin necesidad de sensores, de forma que este sistema de control será en lazo abierto. Para conocer sobre los sensores que se utilizarán en este proyecto y sus características dirigirse a la sección 3.3.8.

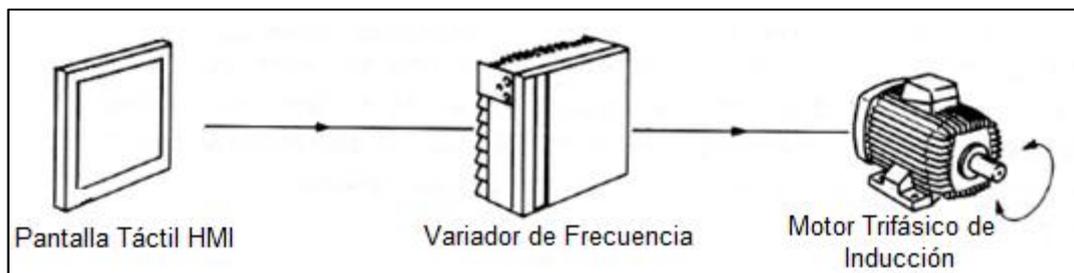


Figura 97. Diagrama general del sistema de control para el arranque y velocidad del motor

3.4.2.2. Control de detención de la máquina al finalizar el ensayo

Este sistema de control permitirá que la máquina se detenga automáticamente en el instante que la probeta se haya roto y por ende el ensayo de fatiga haya culminado.

En vista de la simplicidad de este proceso, un control On-Off o control todo y nada es suficiente para lograr la detención automática de la máquina en el instante de rotura de la probeta, así los dos estados de este control serán:

- **Encendido (On):** Cuando la probeta esté rota y por consiguiente el eje de la máquina desalineado, en este estado no se permitirá el funcionamiento del motor.
- **Apagado (Off):** Cuando la probeta esté fijada y alineada al eje de la máquina, en este estado se permitirá el funcionamiento del motor y se podrá realizar los ensayos de fatiga.

Es de suma importancia alinear correctamente la probeta al eje de la máquina para poder realizar un ensayo, caso contrario al estar desalineada o mal alineada la probeta, se activará el control de detención de la máquina y no se podrá activar el motor.

3.4.2.2.1. Planta: motor trifásico de inducción

En este sistema de control, el motor actuará como la planta (ver figura 96) y tendrá dos estados:

- **Permitido a funcionar:** Cuando la probeta esté fijada y alineada al eje de la máquina.
- **No permitido a funcionar:** Cuando la probeta se haya roto en la realización de un ensayo de fatiga, esto causará que el eje de la máquina se desalinee.

Para tener más referencia de la definición de planta en un sistema de control dirigirse a la sección 3.4.1.4.1. Para referencia de este dispositivo dirigirse a la sección 3.3.1.

3.4.2.2.2. Controlador: HMI-VDF-PLC

El controlador consta de la pantalla táctil HMI, el variador de frecuencia y el PLC; la comunicación entre la pantalla HMI y el VDF será por medio de RS-485 empleando el protocolo de comunicación serial Modbus RTU, la comunicación entre la pantalla HMI y el PLC será mediante Ethernet aplicando el protocolo de comunicación Profinet.

No existirá comunicación directa entre el PLC y el VDF sino que será indirecta a través de la pantalla HMI, de esta forma el PLC recibirá la información del sensor que informa del estado de la probeta y la enviará a la pantalla HMI que al ser un dispositivo inteligente, procesará la información y decidirá sobre el estado de la planta que es el motor, luego de ello la HMI enviará la información de esta decisión al VDF que finalmente hará funcionar o no al motor. En la figura 85 se explica gráficamente este proceso.

Pantalla táctil HMI: Servirá como vínculo entre el PLC y el VDF. Decidirá sobre el estado que tomará el control: Encendido o apagado de acuerdo a la información que reciba del sensor. Mostrará un mensaje que notifique al operador de que el ensayo ha finalizado y mandará una señal al VDF de que detenga el motor. Para tener mayor referencia de este dispositivo dirigirse a la sección 3.4.1.1.

Variador de frecuencia (VDF): Adoptará dos estados:

- **Run (Marcha):** Hará que el motor esté permitido a funcionar.
- **Stop (Paro):** Hará que el motor no esté permitido a funcionar.

Para referencia del variador de frecuencia dirigirse a la sección 3.4.1.2.

PLC: Interpretará la señal que reciba del sensor que informa sobre el estado de la probeta y la enviará a la pantalla HMI para que ésta tome la decisión adecuada, se recuerda que esta señal proveniente del sensor es analógica. Para referencia de este dispositivo dirigirse a la sección 3.4.1.3.

3.4.2.2.3. Realimentación y sensores

La realimentación de un sistema de control es la medición de su señal de salida a través de un sensor, en este caso la señal de salida es el estado del motor que tiene dos posibilidades:

- Capacitado a funcionar
- No capacitado a funcionar

Dadas las características de este proceso, no se requiere un sensor que cuantifique la señal de salida por lo que será un sistema de control en lazo abierto.

Sin embargo se necesita de un sensor que informe sobre la condición de la probeta, por esa razón se utilizará un sensor de distancia que constata la alineación de la probeta al eje de la máquina, cuando la probeta se rompe se desalinea del eje, así que el sensor notifica al controlador que ha acabado

de romperse la probeta y ejecutará la acción de detener el motor. Para mayor referencia del sensor de distancia dirigirse a la sección 3.3.8.1.

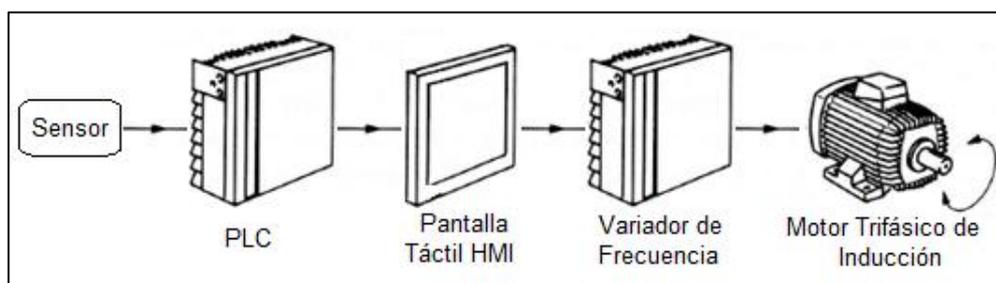


Figura 98. Diagrama general del sistema de control para la detención del de la máquina al finalizar el ensayo

3.5. Diseño de software

3.5.1. Programación PLC

Para la programación del PLC se utilizará código ladder o escalera de acuerdo a la necesidad del proceso; como se detalló en la sección 3.4.1.3.1, el PLC utilizará 4 entradas digitales, 1 entrada analógica y 2 salidas digitales. Debido a la característica que presenta la programación ladder de realizar funciones matemáticas, se propone generar la curva del esfuerzo flector que se mostrará en la pantalla táctil HMI por medio del código del PLC.

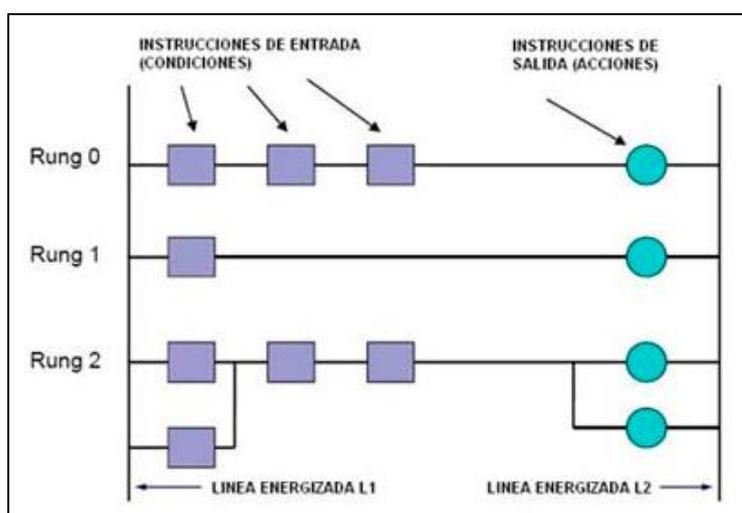


Figura 99. Descripción lógica ladder

Fuente: http://www.rocatek.com/images/forum/ladder_descripcion.jpg

3.5.2. Programación pantalla táctil HMI

En este dispositivo se programará la interfaz humano-máquina (HMI por sus siglas en inglés) que será la nueva herramienta para operar la máquina de ensayos de fatiga, además permitirá el monitoreo de los ensayos de fatiga que se lleven a cabo a través de la visualización en tiempo real de las variables que intervienen en este proceso, especialmente el diagrama del esfuerzo flector que experimenta la probeta en un punto de su superficie cilíndrica (leer sección 3.1.1).

Esta HMI se realizará siguiendo la *Guía Ergonómica de Diseño de Interfaz de Supervisión* (GEDIS), que ofrece un método de diseño enfocado en el control de procesos industriales con salas de monitoreo computarizadas y centralizadas. Esta guía consta de dos fases:

Fase 1: Consiste en especificar los principales elementos de la interfaz, estos son:

- Arquitectura
- Estándares de colores
- Fuentes
- Simbología, etc

Fase 2: Conocida como fase de desarrollo en la cual se recomienda realizar las pantallas de la interfaz conforme se definan los elementos que serán parte de las mismas. De esta manera se logra generar y depurar pantallas con más rapidez.

La figura 100 muestra los elementos de la interfaz para la máquina de ensayos de fatiga, los cuales se definirán a continuación.

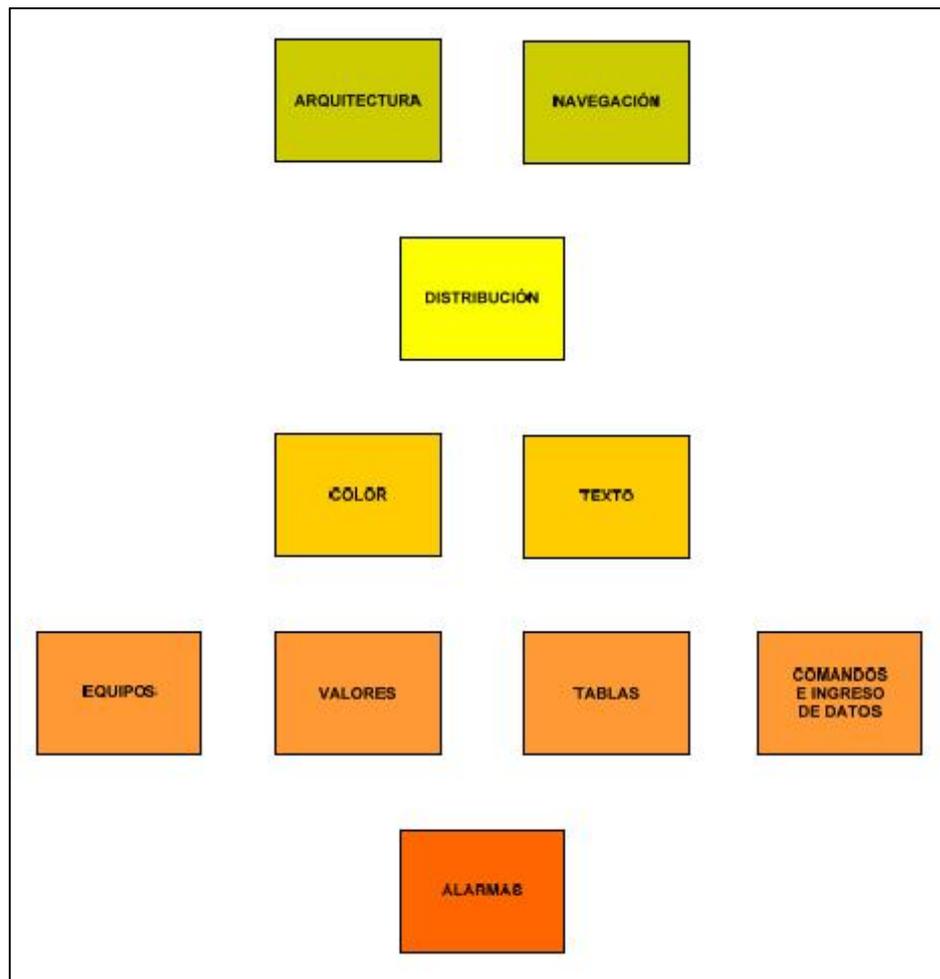


Figura 100. Metodología de desarrollo de una HMI
Fuente: <http://www.epsevg.upc.edu/hcd/material/lecturas/pantalla.pdf>

3.5.2.1. Arquitectura

La arquitectura desarrollada para realizar un ensayo de fatiga es el siguiente:

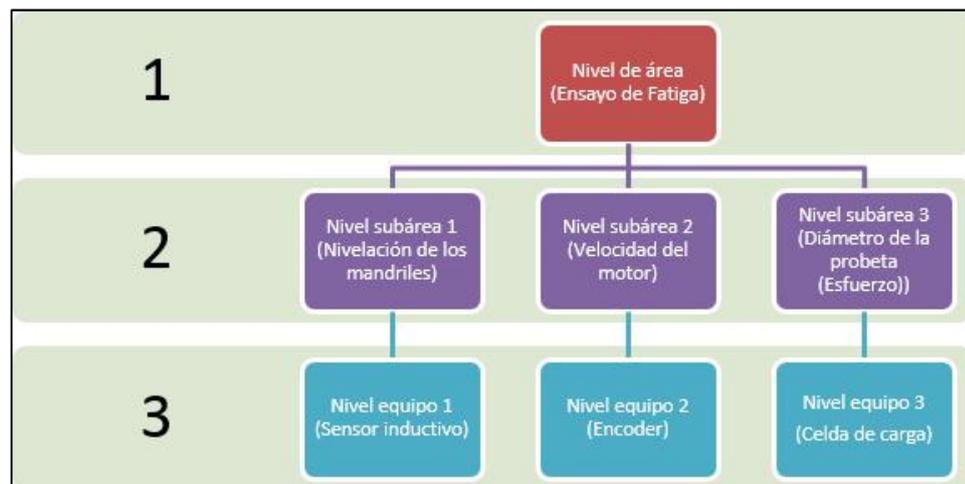


Figura 101. Arquitectura HMI para ensayo de fatiga

3.5.2.2. Indicadores

3.5.2.2.1. Distribución de pantallas

La pantalla principal encargada de mostrar el proceso tiene el siguiente formato:



Figura 102. Distribución de elementos dentro de la pantalla

3.5.2.3. Navegación

Tabla 22.

Iconos de navegación

Nombre	Función	Ícono
Siguiente	Al presionarlo envía a la siguiente pantalla.	
Regresar	Al presionarlo retrocede a la siguiente pantalla.	
Home	Al presionarlo regresa a la pantalla del proceso.	

A través de estos íconos se realiza una navegación horizontal, sin proporcionar errores en el momento de una emergencia.

3.5.2.4. Uso del color

Para las pantallas: principal, y subáreas se utilizó un color de fondo gris y el color de los botones con fondo blanco para resaltar.

3.5.2.5. Uso de fuentes e información textual

Se utilizó 2 tipos de fuentes, uno para la pantalla principal y un segundo para las pantallas de sub proceso, acompañado de dos tamaños de letra, uno para títulos y otro para información y botones.

También se ha utilizado símbolos que identifican el proceso, como es el caso del sensor inductivo para nivelación, un motor para relacionar con la frecuencia y una probeta para ingresar el diámetro.

3.5.2.6. Información y valores del proceso

Se han añadido indicadores para observar los valores del esfuerzo flector máximo y el número de ciclos que lleva la probeta en el instante (tiempo real).

3.5.2.7. Gráficos de tendencias y tablas

Las variables que se encuentran en el gráfico de esfuerzo vs rpm están anidadas con un color distinto.

El gráfico tiene el tamaño adecuado para su correcta visualización, y datos importantes acerca de tendencias y tiempos.

3.5.2.8. Comandos y entradas de datos

En la pantalla de proceso se iniciará el ensayo luego de cumplir con el ingreso de cada parámetro, si alguno no está correctamente ingresado no se podrá iniciar el ensayo. Si hubiese alguna falla durante la ejecución del ensayo se debe presionar de inmediato el paro de emergencia, esto no se lo hace dentro de la configuración de la pantalla por facilidad de uso.

3.5.2.9. Alarmas

Dentro la pantalla de proceso se ha colocado el botón de alarma que al presionarlo accederá a la pantalla de alarmas en donde se realiza el seguimiento de las variables (esfuerzo y rpm), esta pantalla mostrará la prioridad, fecha y hora del evento.

3.5.3. DOPSoft

Es un software especializado en el diseño e implementación de HMIs de la marca comercial DELTA cuya interfaz de trabajo es muy amigable con el usuario y de sencillo uso.

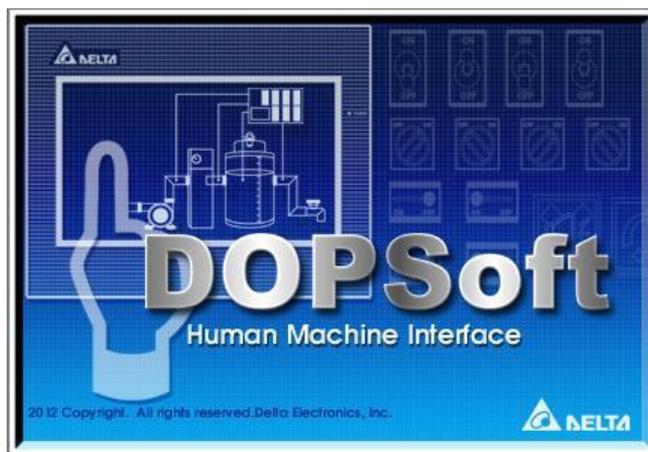


Figura 103. Pantalla de inicio DOPSoft
Fuente: <http://scadaautomatizacion.blogspot.com/>

3.5.3.1. Crear un proyecto

Al iniciarse el programa a continuación se debe crear un nuevo proyecto.

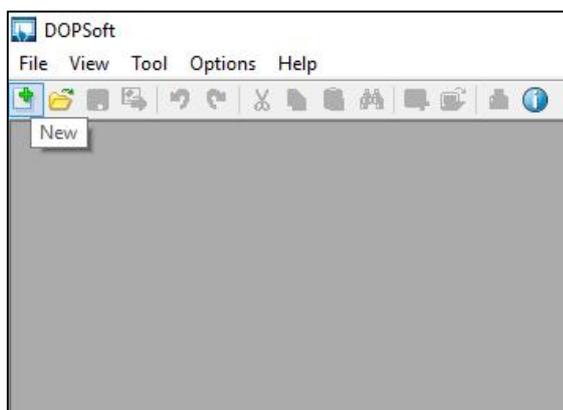


Figura 104. Crear un nuevo proyecto

3.5.3.2. Selección del modelo de pantalla

A continuación se deberá seleccionar el modelo de pantalla además de colocar el nombre del proyecto, nombre de la pantalla principal.

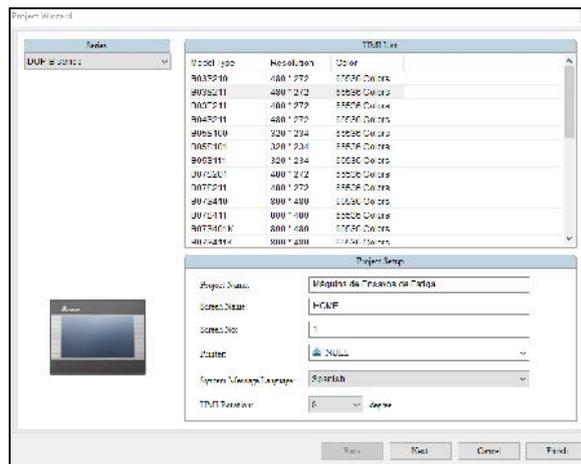


Figura 105. Elección del modelo de pantalla

3.5.3.3. Opciones de comunicación

Al presionar en el botón next aparecerán las opciones para comunicación que posee el modelo de la pantalla seleccionada, para el proyecto se utilizará la comunicación vía Ethernet.

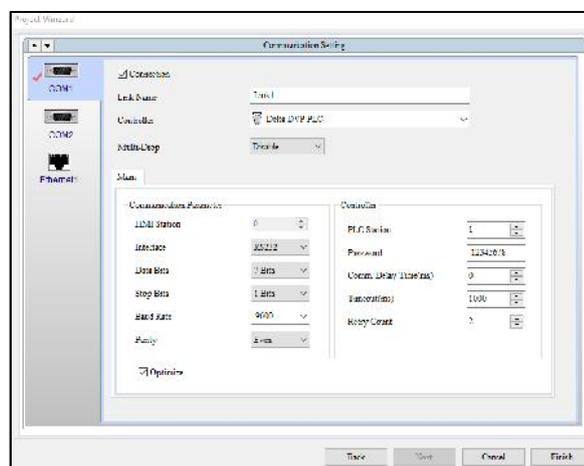


Figura 106. Opciones de comunicación

3.5.3.4. Entorno de trabajo

Luego de establecer las opciones de comunicación se presiona en finish y se abrirá el entorno de trabajo para realizar la interfaz.

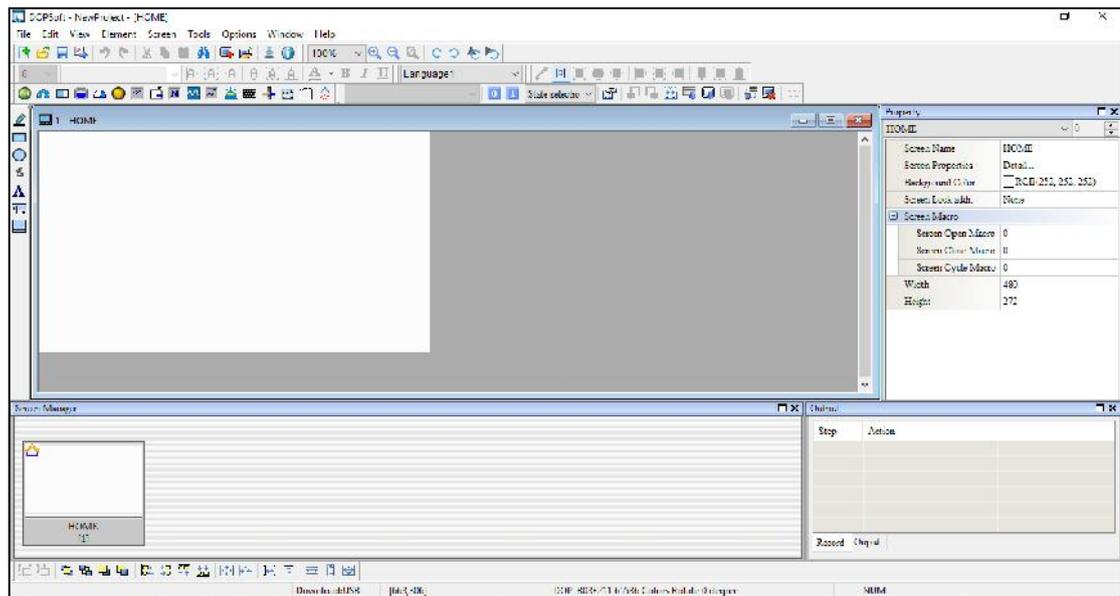


Figura 107. Entorno de trabajo

Los principales componentes del entorno de trabajo son:

- **Espacio de trabajo:** es donde se crea la interfaz con los diferentes tipos de elementos.
- **Barra de menú:** esta contiene nueve alternativas de selección las cuales son: file, edit, view, element, screen, tools, options, window y help.
- **Barra de herramientas:** presenta funciones en forma gráfica, estas son: barra estándar, visualización, texto, elementos, lenguaje, formato y dibujo.
- **Barra de elementos:** dentro de esta barra se encuentran varios componentes que pueden usarse en el espacio de trabajo.
- **Tabla de propiedades:** esta tabla muestra las características y propiedades de los elementos utilizados en el espacio de trabajo.
- **Ventana de salida:** guarda el historial de las acciones ejecutadas con los elementos del espacio de trabajo, también muestra los errores de programación en el momento de la compilación.
- **Ventana de administración:** permite identificar el contenido de cada ventana creada en el espacio de trabajo.

3.5.3.5. Elementos dentro de DOPSoft

DOPSoft posee una gran variedad de elementos para crear la interfaz acorde a las necesidades del usuario, estos son:

- **Botones**
 - Set
 - Reset
 - Momentáneos
 - Multiestado
 - Incremento
 - Decremento, etc

- **Indicadores**
 - ON/OFF
 - Analógicos
 - Barras
 - Multiestado, etc

- **Gráficos**
 - Dispersión
 - Alarmas
 - Estado de variables (XY)

- **Entradas y salidas**
 - Numéricas
 - Caracteres
 - Código de barras
 - Fecha y hora

- **Teclado**

3.5.4. Diseño en DopSoft

3.5.4.1. Pantalla HOME

Es la primera pantalla de la interfaz en donde se presenta a la máquina y se da la opción a realizar un ensayo.



Figura 108. Pantalla HOME

3.5.4.2. Pantalla del proceso



Figura 109. Pantalla de proceso

En esta pantalla se insertan los parámetros necesarios para iniciar un ensayo, en esta se deben insertar tres parámetros:

- Nivelación de mandriles con la probeta colocada
- Frecuencia del motor
- Diámetro de la probeta para cálculo del esfuerzo

3.5.4.3. Pantallas de sub procesos

3.5.4.3.1. Alineamiento de mandriles

En esta pantalla se tiene un indicador el cual cambiará de color (de rojo a verde) cuando los mandriles estén alineados.



Figura 110. Pantalla alineación

3.5.4.3.2. Seteo de frecuencia

En esta pantalla luego de que los mandriles estén alineados se coloca la frecuencia a la cual se va a realizar el ensayo.



Figura 111. Pantalla frecuencia de motor

3.5.4.3.3. Diámetro de la probeta

En esta pantalla se debe ingresar el diámetro de la probeta el cual es un dato necesario para el cálculo del esfuerzo.

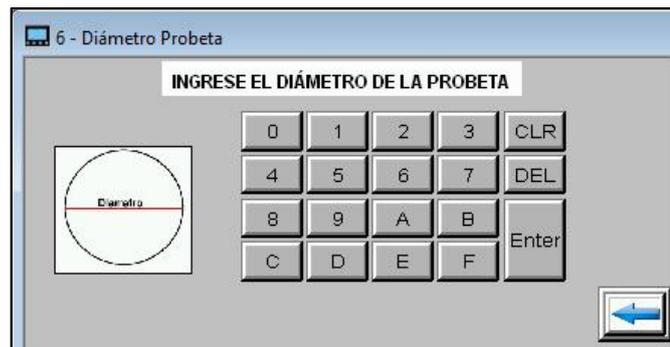


Figura 112. Pantalla diámetro de motor

3.5.4.3.4. Gráfico esfuerzo vs rpm

Luego de ajustar todos los parámetros para el ensayo se debe presionar sobre el botón iniciar para que se genera la gráfica del esfuerzo flector vs las rpm del motor.

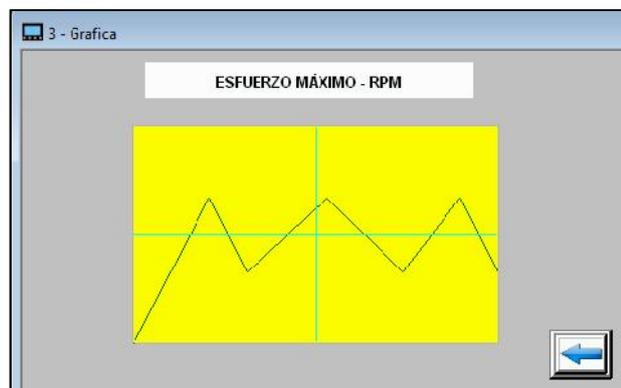


Figura 113. Pantalla gráfica esfuerzo flector

3.5.4.4. Pantalla de alertas

3.5.4.4.1. Alarmas

Dentro de esta pantalla, se mostrarán alertas generales, de advertencia y críticas.

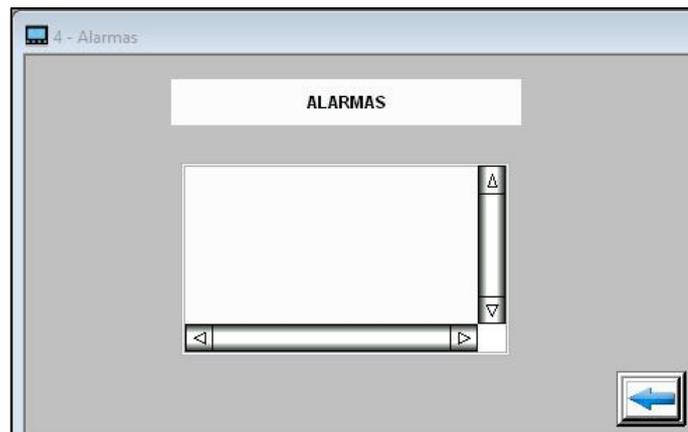


Figura 114. Pantalla de alarmas

3.5.4.4.2. Finalización del ensayo

Esta pantalla muestra el culmino del ensayo, en ella se muestra el valor del esfuerzo flector máximo y a cuantos ciclos se produjo la falla del material.



Figura 115. Pantalla de ensayo finalizado

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Implementación del proceso, equipo o máquina

Cabe mencionar que el diseño mecánico se mantuvo igual con la única diferencia que la capacidad de la máquina para peso colgado se redujo de 50 a 37 kg. Leer sección 3.1.1. Funcionamiento de la máquina y sección 2.1.2. Máquina de ensayos de fatiga tipo R. R. Moore.

Los componentes mecánicos que se construyeron son todos los detallados en la sección 3.2 con excepción del soporte para caja de control ya que ésta finalmente se la empotró en la pared (ver figura 116). Para un mejor entendimiento de los componentes mecánicos instalados dirigirse a los planos mecánicos en Anexos.

4.1.1. Caja de control

La caja de control se equipó con los dispositivos descritos en la etapa de diseño (sección 3.2.1) añadiendo la fuente de -12 y 12 VDC y el acondicionamiento de la celda de carga.



Figura 116. Gabinete empotrado



Figura 117. Interior de la caja de control

4.1.2. Soporte para motor

El soporte del motor se construyó según el diseño planteado (sección 3.2.3) colocándola sobre unas rodela en la base para alzar un poco el motor y alinearlos correctamente al eje de la máquina. El motor también se elevó por medio de rodela.



Figura 118. Motor instalado sobre el soporte

4.1.3. Acople (Matrimonio)

4.1.3.1. Acople flexible de tipo cruceta

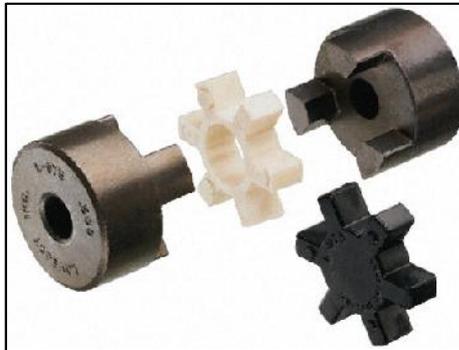


Figura 119. Acople flexible tipo cruceta

Fuente: <http://pt.rs-online.com/web/p/crucetas-de-acoplamiento-de-mordaza/4893812/>

Se utiliza principalmente para la unión de motores con reductores y bombas. Este acoplamiento de tipo cruceta es una solución económica para un rango amplio de potencias, entre sus características podemos encontrar:

- Tiene capacidad de absorber desalineamientos y es bueno para disminuir las vibraciones y oscilaciones torsionales en los ejes.
- La temperatura de funcionamiento es de -40 a +100 °C

El nuevo motor instalado tiene un eje de diámetro menor respecto al motor anterior, por ello fue preciso readecuar el matrimonio instalado en la máquina para el correcto ensamble del motor al eje de la máquina. Esto se hizo a través de un bocín en el costado del matrimonio que embona con el eje del motor.



Figura 120. Bocín adaptado en matrimonio

4.1.4. Acondicionamiento mecánico para sensor de distancia

Se construyó e instaló una placa para la colocación del sensor de distancia como se observa en la figura 120. Adicionalmente se debió instalar unas guías para delimitar el eje de la máquina dentro del área de acción del sensor como se ve en la figura 121.

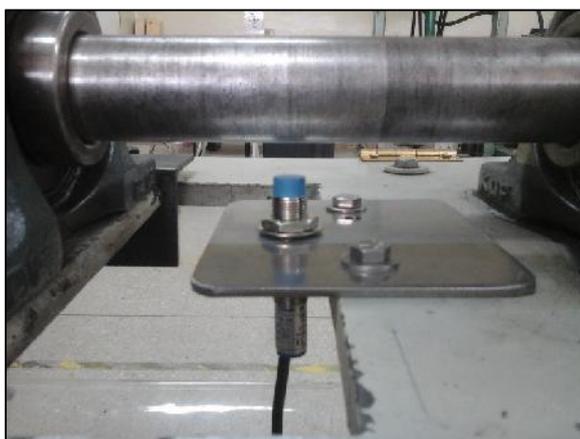


Figura 121. Sensor de distancia instalado

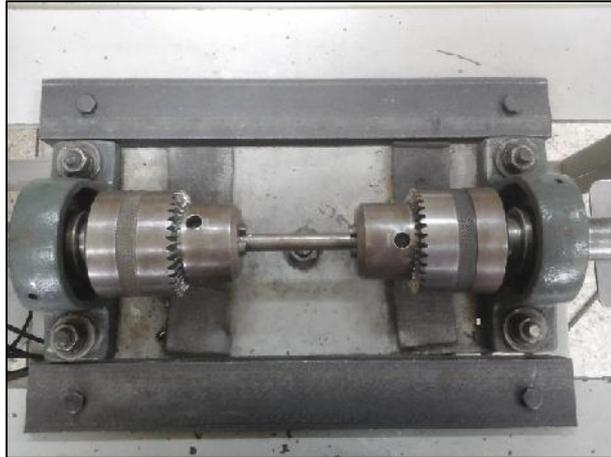


Figura 122. Guías para el sensor de distancia

4.1.5. Acondicionamiento mecánico para celda de carga

El acondicionamiento mecánico para la celda de carga se construyó de acuerdo al diseño propuesto (sección 3.2.5) para lo cual se cortó el eje del portapesas y se maquinó un roscado de M8x1.25.



Figura 123. Acondicionamiento celda de carga

4.1.6. Acoplamiento encoder-motor

Se realizó el acople (couplin) sin perforar al eje del motor como se había propuesto en un inicio ya que por su pequeño tamaño no había forma de colocar pasadores en él, entonces lo que hizo es realizar un destaje en el eje del motor.

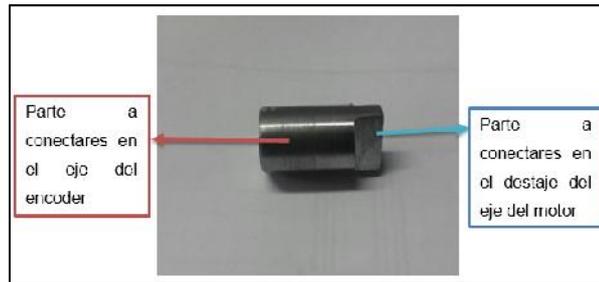


Figura 124. Vista frontal - couplin



Figura 125. Vista lateral - couplin



Figura 126. Acople motor-encoder

La estructura del encoder está sujeta a la carcasa del motor para garantizar que solo el eje del encoder sea el que gire.

La siguiente imagen muestra como se realiza el acople entre el eje del motor y el eje del encoder:

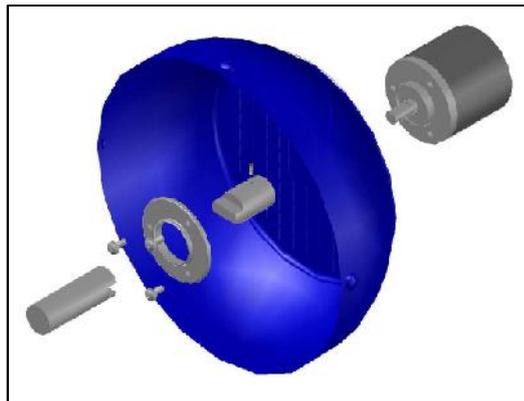


Figura 127. Despiece - acople motor-encoder

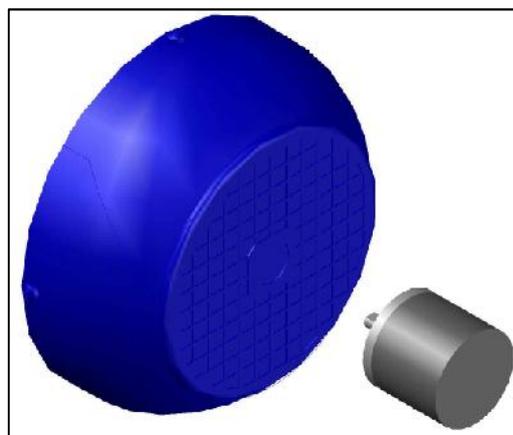


Figura 128. Acople motor-encoder

Como se puede observar el encoder entra a presión con la tapa posterior de la carcasa del motor, luego se coloca el cuplin y este se sujeta con el eje del encoder a través de un prisionero M2x0.4, luego se ajusta el encoder con la placa de sujeción con 3 tornillos, (para más detalle ir al plano Acople motor – encoder en Anexos).

4.1.7. Protección para encoder

Se colocó una estructura de protección para el encoder ya que éste se sitúa a la intemperie y es probable que sufra algún tipo de daño, para ello se realizó una estructura de lámina mallada con espesor de 1 mm, la cual se sujetará al skid de la máquina a través de 2 pernos de 1/4" x 1".

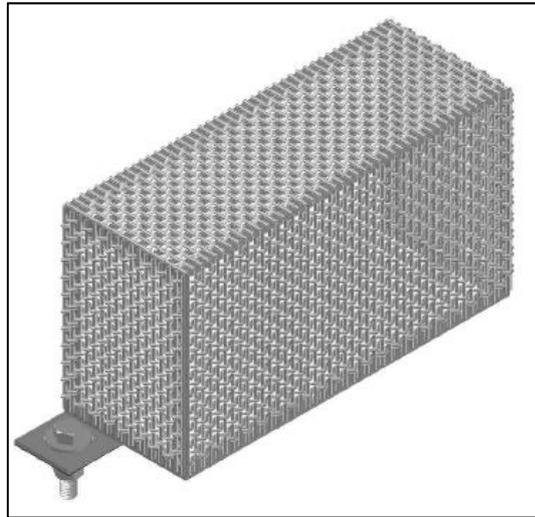


Figura 129. Protección encoder

4.2. Implementación de los componentes eléctricos y electrónicos

Prácticamente se implementaron todos los dispositivos que se detalla en el diseño (sección 3.3), en esta sección se hablará sobre las especificaciones técnicas reales de los dispositivos que se instalaron en el proyecto.

4.2.1. Motor trifásico de inducción

El motor se acopló al eje de la máquina mediante un matrimonio como se explica en la sección 4.1.3. La placa del motor se muestra en la figura 129:



Figura 130. Placa de motor WEG

Según el manual W22 Motor Eléctrico Trifásico, la placa del motor describe las siguientes características:

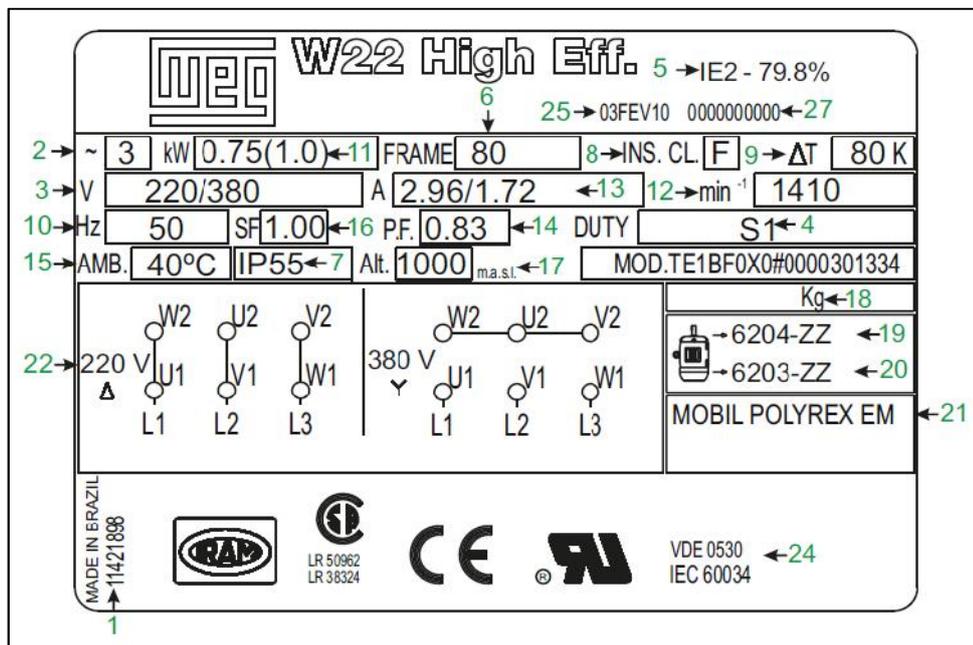


Figura 131. Layout de la placa de identificación para carcasas 63 a 132
Fuente: W22 Motor Eléctrico Trifásico, Catálogo técnico mercado latinoamericano, sección placa de identificación

- Donde:
1. Código del motor
 2. Número de fases
 3. Tensión nominal de operación

4. Régimen de servicio
5. Eficiencia
6. Tamaño de carcasa
7. Grado de protección
8. Clase de aislamiento
9. Sobrelevación de temperatura del motor
10. Frecuencia
11. Potencia nominal del motor
12. Velocidad nominal del motor
13. Corriente nominal del motor
14. Factor de potencia
15. Temperatura ambiente máxima
16. Factor de servicio
17. Altitud ambiente máxima
18. Peso del motor
19. Especificación del rodamiento delantero
20. Especificación del rodamiento trasero
21. Tipo de grasa de los rodamientos
22. Diagrama de conexión
24. Certificaciones
25. Fecha de fabricación
27. Número serial

El lugar donde se encuentra instalada la máquina está a 2500 m.s.n.m., se puede observar que este motor está diseñado para una altura máxima de 1000 m.s.n.m., lo que significa que la eficiencia real del motor será menor que la nominal, es decir el motor no desarrollará enteramente su potencia nominal. Este problema se compensa gracias al aumento del factor de servicio que para este motor es de 1.15, es decir que trabaja al 115% de su capacidad, la Norma NEMA para motores y generadores en su sección 14.4.2 afirma que los motores que tienen un factor de servicio de 1.15 o superior funcionarán satisfactoriamente con factor de servicio a altitudes

superiores a 3300 pies (1000 metros) hasta 9000 pies (2740 metros) (Nacional de Fabricantes Eléctricos Asociación, 1998).

El régimen de servicio en este motor es S1 lo que significa que puede trabajar ininterrumpidamente sin sobrecalentarse, tiene un grado de protección IP55 que salvaguarda al motor de polvo y agua. Este motor presenta también un aislamiento clase F que soporta temperaturas de 155 °C, el cual es excelente para recubrimiento de conductores e impregnación de bobinados.

En cuanto se refiere a la velocidad, este motor imprime una velocidad máxima de 1680 RPM, considerando que su velocidad de sincronismo es de 1800 RPM por tener cuatro polos y su alimentación es con una tensión 60 Hz de frecuencia, tiene un deslizamiento del 6.67%.



Figura 132. Acoplamiento motor – encoder - máquina

4.2.2. Circuito de alimentación

4.2.2.1. Instalación trifásica

Para alimentar los dispositivos que requieren corriente alterna fue necesario implementar un conector que embone en los enchufes trifásicos que dispone el laboratorio, los cuales se muestran en las figuras 132 y 133.



Figura 133. Toma trifásica - Laboratorio



Figura 134. Conector trifásico

El conector trifásico fue atornillado a un cable concéntrico tetrapolar (ver sección 4.2.6.1).

4.2.2.2. Fuente de poder

El consumo energético de los dispositivos de corriente continua que se implementaron en este proyecto es el mismo descrito en el diseño, de esta forma se adquirió la misma fuente propuesta (sección 3.3.2.2), misma que proporciona 24 VDC con un máximo de 2.5 A.



Figura 135. Datos fuente de poder

4.

4.2.2.

4.2.3. Pulsador de emergencia

Cuando se adquirió el pulsador de emergencia, vino incluido un contacto normalmente cerrado categoría AC-14 para 240 VAC, en vista de la dificultad para conseguir el contacto categoría DC-13 propuesto en el diseño (sección 3.3.3, tabla 13), se decidió hacer las conexiones con el contacto AC-14 con la debida verificación de su funcionamiento.

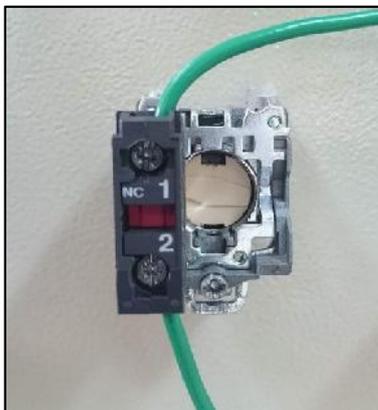


Figura 136. Conexión pulsador de emergencia

4.2.4. Indicadores eléctricos

Se instalaron dos luces piloto, una de color rojo y otra de color verde, tal cual se estableció en el diseño, para ver el funcionamiento de las mismas, dirigirse a la sección (sección 3.3.4).

Las luces piloto adquiridas tienen un consumo de 200 mA cada una, se recuerda que se hizo el dimensionamiento de las mismas en el capítulo 3 con una corriente de 2 A que es el valor nominal de las salidas tipo relé del PLC (tabla 21).



Figura 137. Conexión luces piloto

4.2.5. Borneras

Se implementaron 20 borneras de cable AWG18 para ampliar el número de tomas de la fuente de poder, 10 borneras con puente para las tomas de 24 VDC y otras 10 borneras puenteadas para 0 VDC.



Figura 138. Borneras

4.2.6. Cableado

4.2.6.1. Cableado eléctrico

El consumo de corriente de todos los dispositivos se detallan en la sección 3.3.6.1, concretamente en la tabla 15 (para un completo entendimiento se recomienda revisar la tabla 15 conjuntamente con los planos eléctricos). En consecuencia se tendió cable calibre AWG16 y AWG18 para las conexiones eléctricas adquirido del catálogo de productos comerciales de General Cable.

Para las conexiones que se encuentran dentro de la caja de control se implementó cable descrito en la tabla 23.

Tabla 23.
Especificaciones técnicas cables eléctricos para interior

CALIBRE	DIAMETRO CONDUCTOR	# HILOS	DIAMETRO HILO	ESPESOR NOMINAL AISLACION	DIAMETRO AISLADO APROX.	DIAMETRO TOTAL APROX.	PESO TOTAL APROX.	RESIST. MAXIMA 20°C C.C	CAPAC. DE CORRIENTE (A) 30°
AWG	mm	cantidad	mm	mm	mm	mm	kg/km	Ω/Km	Ω/Km
10	3,0	39	0,41	0,79	4,8	5,5	64	3,41	30
12	2,4	24	0,41	0,66	3,9	4,0	40	5,41	25
14	1,9	25	0,32	0,58	3,2	3,5	26	8,59	18
16	1,5	16	0,32	0,58	2,73	3,1	17,72	13,7	13
18	1,2	10	0,32	0,58	2,4	2,8	12,41	21,8	10

ESPECIFICACION:

La fabricación de estos productos está basada en normas ASTM B-3, B-174, UL83, SAE J558-a

APLICACIÓN:

En la conexión de sistemas de iluminación, señales y paneles de control. Se instala preferentemente en lugares donde se necesita soportar una mayor temperatura ambiente. Ej.: en el interior de automóviles, dentro de luminarias, armarios de control, etc

AISLANTE:

Cloruro de polivinilo (PVC) de 105° C, resistente a la humedad, no propaga la llama.

VOLTAJE: 600V

TEMPERATURA: 105°C

Fuente: General Cable cablec, Catálogo de productos comerciales, sección cables flexibles GPT 600V

Para las conexiones que están entre la caja de control y la máquina, se implementó cable concéntrico tripolar y tetrapolar descritos en la tabla 24.

Tabla 24.
Especificaciones técnicas cables eléctricos para exterior

CONDUCTOR											
CALIBRE	SECCION APROX.	CONSTRUCCION		DIAMETRO	PESO Cu TOTAL APROX.	ESPESOR DEL NUCLEO	DIAMETRO DEL NUCLEO	ESPESOR DE CHAQUETA	DIAMETRO EXTERIOR APROX.	PESO TOTAL APROX.	CAPACIDAD CONDUCT.
		CLASE J									
		#	DIAMETRO								
AWG o MCM	mm	Hilos	mm	mm	Kg/Km	mm	mm	mm	mm	Kg/Km	Amp
TRIPOLARES											
3 x 18	0,82	10	0,32	1,22	22,93	0,76	5,90	1,14	8,18	89,91	9
3 x 16	1,31	16	0,32	1,52	37,27	0,76	6,55	1,14	8,83	113,01	12
3 x 14	2,08	26	0,32	1,98	58,77	1,14	9,18	1,14	11,46	186,3	14
3 x 12	3,31	41	0,32	2,57	93,19	1,14	10,45	1,14	12,73	243,65	18
3 x 10	5,26	65	0,32	3,20	149,09	1,14	11,81	1,52	15,85	382,04	24
TETRAPOLARES											
4 x 18	0,82	10	0,32	1,22	30,57	0,76	6,61	1,14	8,89	113,14	8
4 x 16	1,31	16	0,32	1,52	46,69	0,76	7,34	1,14	9,62	143,58	10
4 x 14	2,08	26	0,32	1,98	78,36	1,14	10,28	1,14	12,56	240,12	13
4 x 12	3,31	41	0,32	2,57	124,26	1,14	11,71	1,52	14,75	339,96	16
4 x 10	5,26	65	0,32	3,20	198,79	1,14	13,23	1,52	17,27	486,91	22

ESPECIFICACIÓN:
ASTM B 174, COVENIN 397

APLICACIÓN:
Distribución de energía a baja tensión, usos industriales en bandejas, ductos, conduit o directamente enterrados, interconexión de aparatos de protección, motores, iluminación señales, semáforos, equipos, tableros de control, extensiones flexibles para equipos y herramientas portátiles, o usos generales donde la temperatura del conductor no exceda los 60°C en lugares secos y/o húmedos.

AISLANTE:
Cloruro de polivinilo (PVC) de 105°C, resistente a la humedad, no propaga la llama

COLORES:
Conductores aislados: blanco, negro, rojo, verde
Chaqueta exterior negra.

TEMPERATURA:
105°C

Fuente: General Cable cablec, Catálogo de productos comerciales, sección cables de fuerza-control 600V-105°C

Específicamente cable concéntrico se utilizó para lo siguiente:

- **Alimentación general:** Cable 4 x 16; tetrapolar para 3 fases y tierra
- **Sensor de distancia:** Cable 3 x 18; tripolar para Vcc, Vdd y salida (la hoja técnica del sensor de distancia se adjunta en Anexos)
- **Celda de carga:** Cable 4 x 18; tetrapolar para Vcc, Vdd, salida positiva y salida negativa (la hoja técnica de la celda de carga se adjunta en Anexos)
- **Encoder:** Cable 4 x 18; para Vcc, Vdd, fase A y fase B (la hoja técnica del encoder se adjunta en Anexos) aunque no se utilizó la fase B, se tendió el cableado hacia el PLC.

4.2.6.2. Cableado de comunicación

Cable RS-485: Comunicación pantalla táctil HMI – Variador de frecuencia



Figura 139. Instalación RS-485 en HMI

El cable RS-485 está elaborado con cable UTP categoría 6. Se puede observar en la figura 138 que en un extremo se tiene soldado conector DB9 macho para acoplarlo en la pantalla táctil HMI mientras que en la figura 139 se aprecia que el otro extremo no tiene ningún conector ya que se conectará directamente en bornera que tiene el variador de frecuencia como puerto de comunicación.

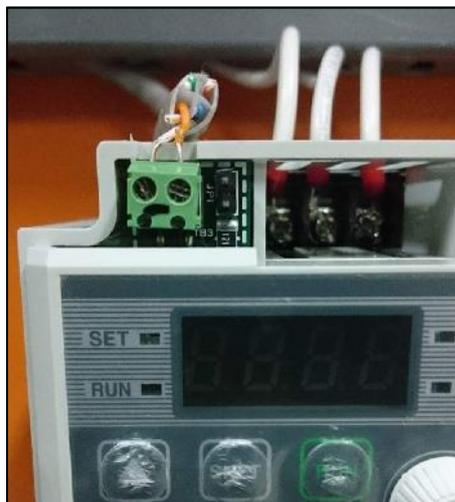


Figura 140. Instalación RS-485 en VDF

Cable Ethernet: Comunicación pantalla táctil HMI – PLC



Figura 141. Cable Ethernet

El cable Ethernet está hecho con cable UTP categoría 6. En ambos extremos tiene conectores RJ45 con capuchones de protección.

4.2.7. Protecciones eléctricas

En este proyecto se implementaron tres disyuntores magnetotérmicos tal como se señaló en el diseño (sección 3.3.7), con la diferencia de que se sobredimensionaron las protecciones para el PLC y la fuente de poder por la poca disponibilidad de disyuntores magnetotérmicos de 1 A en el mercado. Así que se tienen las siguientes protecciones eléctricas:

- **Disyuntor para VDF:** Tripolar de 6 A
- **Disyuntor para PLC:** Bipolar de 2 A
- **Disyuntor para fuente de poder:** Bipolar de 2 A

Tales disyuntores se dispusieron con la finalidad de dar autonomía a cada uno de los tres dispositivos, al variador de frecuencia, al PLC y a la fuente de poder; es decir cada dispositivo se energizará activando su disyuntor correspondiente; el disyuntor tripolar aparte de energizar el variador de frecuencia, suministra energía a todo el sistema también. Esto se puede observar en los planos eléctricos en Anexos.



Figura 142. Disyuntores, de izquierda a derecha: tripolar, bipolares

4.2.8. Sensores y acondicionamientos

4.2.8.1. Sensor de distancia

El sensor de distancia instalado es el mismo explicado en el diseño (sección 3.3.8.1), consiste de un sensor inductivo de proximidad de 24 VDC de alimentación cuya respuesta es digital; el alcance de sensado es de 0 a 4 mm., la hoja técnica del sensor se adjunta en Anexos.



Figura 143. Sensor de distancia

4.2.8.2. Celda de carga

La celda de carga instalada en la máquina es la que se detalla en el diseño (sección 3.3.8.2), en vista de su respuesta eléctrica tan baja fue preciso incorporar un acondicionamiento para la comunicación con el PLC descrito en la sección 4.2.8.3. Las especificaciones técnicas de este sensor se explican en la figura 76 y se adjunta su hoja técnica en Anexos.



Figura 144. Celda de carga acoplada

4.2.8.3. Acondicionamiento celda de carga

Tal como se observó en el diseño del circuito de acondicionamiento de la celda de carga, éste fue implementado en una tarjeta electrónica y colocado dentro del gabinete como se muestra en las figuras 144 y 145.

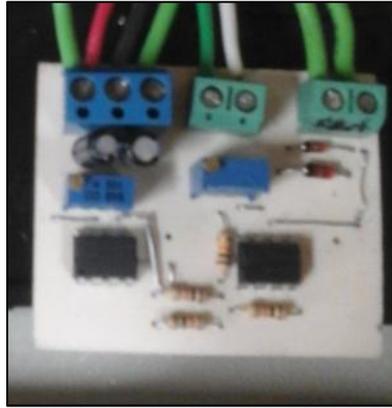


Figura 145. Placa acondicionamiento celda de carga



Figura 146. Caja para acondicionamiento

Fue preciso verificar la respuesta de la celda de carga acondicionada que recibe el PLC y la transforma a través de su convertidor análogo digital (CAD PLC), cabe mencionar que la celda se encendió con el portapesas instalado que tiene un peso aproximado de 4 kg. A continuación se muestra la curva que describe la respuesta de la celda de carga acondicionada.

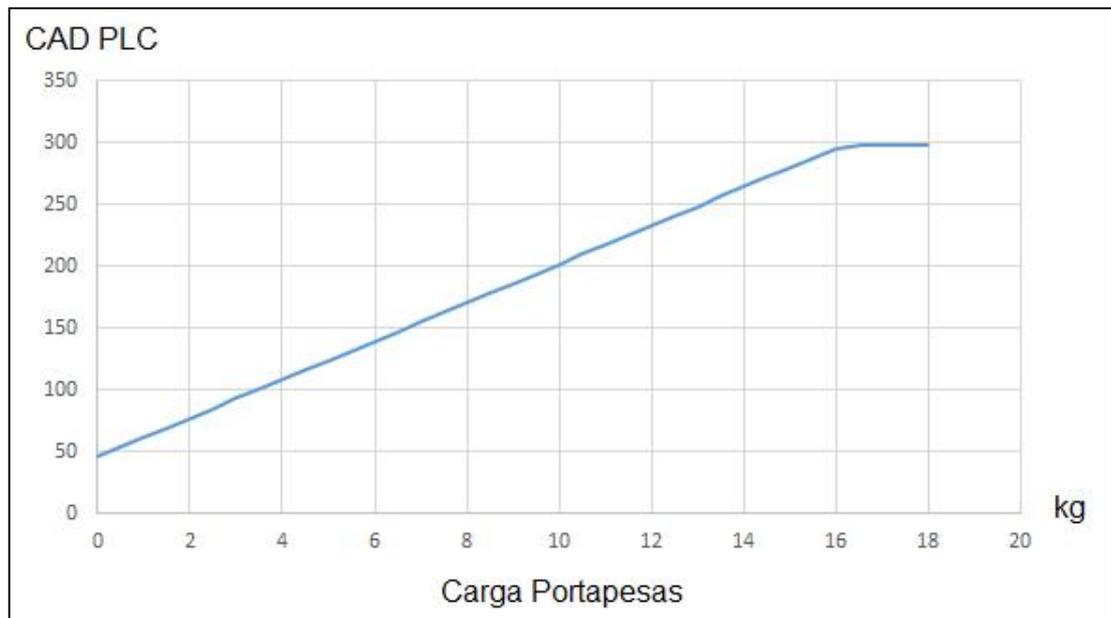


Figura 147. Respuesta de la celda de carga acondicionada

En la figura 146 se observa que la celda acondicionada trabaja en un rango de carga del portapesas de 0 a 16 kg, es decir el acondicionamiento de la celda como tal sensa valores de 0 a 20 kg sumando los 4 kg del portapesas.

4.2.8.4. Encoder

El encoder propuesto en el diseño fue uno con respuesta de 600 pulsos por revolución, sin embargo se instaló uno de 360 pulsos por revolución. La hoja técnica de este encoder se adjunta en Anexos.

En resumen se adquirieron e implementaron los mismos dispositivos eléctricos y electrónicos planteados previamente en el diseño (sección 3.3) con excepción de los disyuntores bipolares, el contacto para el pulsador de emergencia y el encoder.

4.3. Implementación del sistema de control

Este proyecto de titulación incorpora dos sistemas de control para su funcionamiento:

- Arranque y regulación de la velocidad del motor
- Detención de la máquina al finalizar el ensayo

Tales sistemas fueron implementados siguiendo el diseño planteado en la selección de sistema de control (sección 3.4.2); los dispositivos que se adquirieron para ello son los que se propusieron en la etapa previa de dimensionamiento con excepción del PLC.

4.3.1. Pantalla táctil HMI

La pantalla táctil HMI implementada es la que se propuso en la etapa de diseño (sección 3.4.1.1), la hoja técnica de este dispositivo se adjunta en Anexos.



Figura 148. Pantalla táctil HMI instalada

4.3.2. Variador de frecuencia (VDF)

El variador de frecuencia implementado es el que se propuso en la etapa de diseño (sección 3.4.1.2), el manual de usuario de este dispositivo se adjunta en Anexos.



Figura 149. Variador de frecuencia instalado

4.3.3. PLC

El PLC implementado varía del propuesto en el diseño (sección 3.4.1.3) en la selección de CPU, se planteó adquirir un PLC de CPU 1211C pero se implementó uno de CPU 1212C. Cabe acotar que las dimensiones

son iguales y las especificaciones eléctricas no alteraron al funcionamiento del sistema.



Figura 150. PLC instalado

En resumen se adquirieron e implementaron los mismos dispositivos electrónicos planteados para el diseño del sistema de control (sección 3.4) con excepción del PLC.

4.4. Programación del sistema de control

4.

4.3.

4.4.1 Pantalla táctil HMI

En esta pantalla se implementó la HMI que comanda al proceso, dicha HMI se realizó siguiendo la metodología GEDIS descrita en la sección 3.5.2. Programación pantalla táctil HMI obteniendo el siguiente resultado:



Figura 151. Pantalla 1 Home



Figura 152. Pantalla 2 Proceso



Figura 153. Pantalla 3 Curva

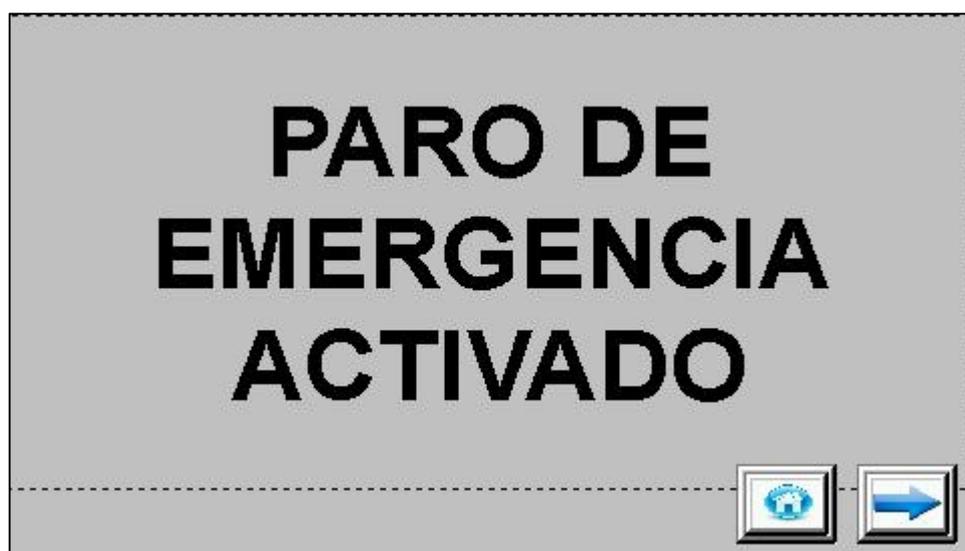


Figura 154. Pantalla 4 Alarmas

INGRESE LA VELOCIDAD DEL MOTOR

NOTA: Esta debe estar entre 200 y 1680 RPM



RPM

Figura 155. Pantalla 5 Velocidad Motor

INGRESE EL DIÁMETRO DE LA PROBETA



##.## mm

Figura 156. Pantalla 6 Diámetro Probeta

INGRESE LA CARGA DE LA PROBETA

PORTAPESAS	12345.6	kg
CARGA TOTAL	12345.6	kg



Figura 157. Pantalla 7 Carga Probeta

ENSAYO FINALIZADO



σ	123456
CICLOS:	1234567891

Por favor mida la temperatura de la probeta



Figura 158. Pantalla 8 Ensayo Finalizado

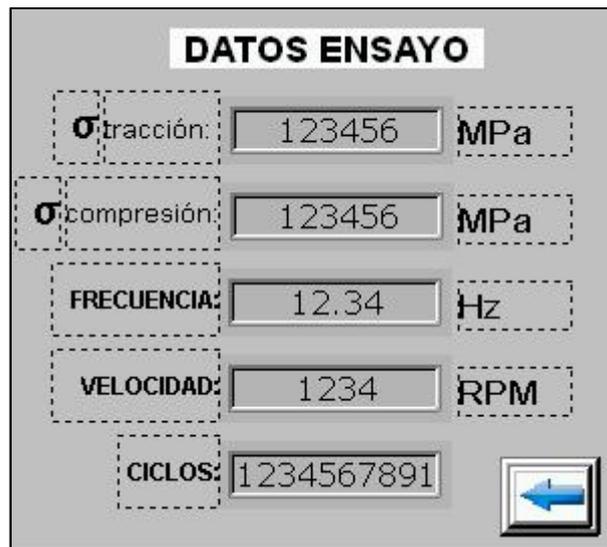


Figura 159. Pantalla 9 Datos Curva

El controlador de la pantalla táctil HMI obedece a las siguientes instrucciones programadas en lenguaje C:

```

1 $I01 = {HMI-VDF}1@W40005*7
2 $I00 = $I01/15
3 #Cálculo de la frecuencia mostrada en la pantalla DATOS CURVA
4
5 IF $I0.0 == ON
6 # $I0.0 se pone en alto cuando se pulsa INICIAR en la pantalla PROCESO
7 IF {HMI-PLC}2@IO.5 == ON
8 #Entrada IO.5 se pone en alto cuando se activa el sensor de distancia
9 {HMI-VDF}1@W40006 = 417
10 #Direccionamiento al registro 0006 del VDF que controla el arranque del motor,
11 #escritura del valor 417 que significa STOP, por lo tanto el motor se detendrá
12 {HMI-VDF}1@W40005 = 0
13 #Direccionamiento al registro 0005 del VDF que controla la frecuencia del motor,
14 #escritura del valor 0 para resetear el parámetro de velocidad del motor
15 $0 = 8
16 #Registro $0 controla las pantallas que se muestra en la HMI, igualado a 8 mostrará
17 #la pantalla ENSAYO FINALIZADO
18 DELAY 500
19 #retardo de 500 milisegundos
20 BITOFF $I0.0
21 # $I0.0 se pone en bajo
22 ENDIF
23 ENDIF
24
25 IF {HMI-PLC}2@IO.7 == OFF
26 #Entrada IO.7 se pone en bajo cuando se activa el paro de emergencia
27 {HMI-VDF}1@W40006 = 417
28 #Direccionamiento al registro 0006 del VDF que controla el arranque del motor,
29 #escritura del valor 417 que significa STOP, por lo tanto el motor se detendrá
30 $0 = 4
31 #Registro $0 controla las pantallas que se muestra en la HMI, igualado a 4 mostrará
32 #la pantalla ALARMAS
33 DELAY 1
34 #retardo de un segundo
35 ENDIF
36
37 IF {HMI-VDF}1@W40005 >= 714
38 #Direccionamiento al registro 0005 del VDF que controla la frecuencia del motor,
39 #condición del parámetro de velocidad del motor mayor o igual a 200 RPM
40 IF $6.0 == ON

```

Figura 160. Captura 1

```

41 #\$6.0 se pone en alto con el botón ACEPTAR de la pantalla VELOCIDAD MOTOR
42 BITON \$1.0
43 #\$1.0 se pone en alto
44 DELAY 500
45 #retardo de 500 milisegundos
46 BITOFF \$6.0
47 #\$6.0 se pone en bajo
48 ENDIF
49 ENDIF
50
51 IF \$6.1 == ON
52 #\$6.1 se pone en alto con el botón ACEPTAR de la pantalla DIÁMETRO PROBETA
53 IF {HMI-PLC}2@Q1.4 == ON
54 #Interacción de la pantalla HMI con el PLC (segmento 15 del código ladder)
55 BITON \$1.1
56 #\$1.1 se pone en alto
57 BITOFF \$6.1
58 #\$6.1 se pone en bajo
59 ENDIF
60 ENDIF
61
62 IF \$6.2 == ON
63 #\$6.2 se pone en alto con el botón ACEPTAR de la pantalla CARGA PROBETA
64 BITON \$1.2
65 #\$1.2 se pone en alto
66 DELAY 500
67 #retardo de 500 milisegundos
68 BITOFF \$6.2
69 #\$6.2 se pone en bajo
70 ENDIF
71
72 IF \$1 == 7
73 #\$1.0, \$1.1 y \$1.2 están en alto
74 IF {HMI-PLC}2@IO.5 == OFF
75 #Entrada IO.5 se pone en bajo cuando se mantiene desactivado el sensor de
76 #distancia
77 BITON \$2.0
78 #\$2.0 se pone en alto cuando en la HMI se ha ingresado los parámetros de:
79 #velocidad del motor, diámetro de la probeta y carga de la probeta y además
80 #se encuentra desactivado el sensor de distancia

```

Figura 161. Captura 2

```

81 ENDIF
82 ENDIF
83
84 #Línea 86 hasta 100: Interacción de la pantalla HMI con el PLC (segmento
85 #15 del código ladder)
86 IF $2.0 == ON
87 BITON {HMI-PLC}2@I1.0
88 ENDIF
89
90 IF $2.0 == OFF
91 BITOFF {HMI-PLC}2@I1.0
92 ENDIF
93
94 IF $1.2 == ON
95 BITON {HMI-PLC}2@Q1.2
96 ENDIF
97
98 IF $1.2 == OFF
99 BITOFF {HMI-PLC}2@Q1.2
100 ENDIF
101
102 IF $3.0 == ON
103 # $3.0 se pone en alto con el botón HOME de la pantalla PROCESO
104 {HMI-VDF}1@W40005 = 0
105 #Direccionamiento al registro 0005 del VDF que controla la frecuencia del motor,
106 #escritura del valor 0 para resetear el parámetro de velocidad del motor
107 {HMI-PLC}2@MD48 = 0
108 #Direccionamiento al registro MD48 del PLC que almacena el diámetro de la
109 #probeta ingresado en la pantalla HMI, escritura del valor 0 para resetear
110 #el parámetro de diámetro de la probeta
111 BITOFF $1.0
112 # $1.0 se pone en bajo
113 BITOFF $1.1
114 # $1.1 se pone en bajo
115 BITOFF $1.2
116 # $1.2 se pone en bajo
117 BITOFF $2.0
118 # $2.0 se pone en bajo
119 DELAY 500
120 #retardo de 500 milisegundos

```

Figura 162. Captura 3

```

121 BITOFF $3.0
122 # $3.0 se pone en bajo
123 ENDIF
124
125 IF $3.1 == ON
126 # $3.1 se pone en alto con el botón HOME de la pantalla ENSAYO FINALIZADO
127 {HMI-VDF}1@W40005 = 0
128 #Direccionamiento al registro 0005 del VDF que controla la frecuencia del motor,
129 #escritura del valor 0 para resetear el parámetro de velocidad del motor
130 {HMI-PLC}2@MD48 = 0
131 #Direccionamiento al registro MD48 del PLC que almacena el diámetro de la
132 #probeta ingresado en la pantalla HMI, escritura del valor 0 para resetear
133 #el parámetro de diámetro de la probeta
134 BITOFF $1.0
135 # $1.0 se pone en bajo
136 BITOFF $1.1
137 # $1.1 se pone en bajo
138 BITOFF $1.2
139 # $1.2 se pone en bajo
140 BITOFF $2.0
141 # $2.0 se pone en bajo
142 DELAY 500
143 #retardo de 500 milisegundos
144 BITOFF $3.1
145 # $3.1 se pone en bajo
146 ENDIF
147
148 IF $3.2 == ON
149 # $3.2 se pone en alto con el botón HOME de la pantalla ALARMAS
150 {HMI-VDF}1@W40005 = 0
151 #Direccionamiento al registro 0005 del VDF que controla la frecuencia del motor,
152 #escritura del valor 0 para resetear el parámetro de velocidad del motor
153 {HMI-PLC}2@MD48 = 0
154 #Direccionamiento al registro MD48 del PLC que almacena el diámetro de la
155 #probeta ingresado en la pantalla HMI, escritura del valor 0 para resetear
156 #el parámetro de diámetro de la probeta
157 BITOFF $1.0
158 # $1.0 se pone en bajo
159 BITOFF $1.1
160 # $1.1 se pone en bajo

```

Figura 163. Captura 4

```
161 BITOFF $1.2
162 #$1.2 se pone en bajo
163 BITOFF $2.0
164 #$2.0 se pone en bajo
165 DELAY 500
166 #retardo de 500 milisegundos
167 BITOFF $3.2
168 #$3.2 se pone en bajo
169 ENDIF
170
171 IF $4.0 == ON
172 #$4.0 se pone en alto con el botón de ingreso del parámetro velocidad del motor
173 #de la pantalla PROCESO
174 BITOFF $1.0
175 #$1.0 se pone en bajo
176 DELAY 500
177 #retardo de 500 milisegundos
178 BITOFF $4.0
179 #$4.0 se pone en bajo
180 ENDIF
181
182 IF $4.1 == ON
183 #$4.1 se pone en alto con el botón de ingreso del parámetro diámetro de la probeta
184 #de la pantalla PROCESO
185 BITOFF $1.1
186 #$1.1 se pone en bajo
187 DELAY 500
188 #retardo de 500 milisegundos
189 BITOFF $4.1
190 #$4.1 se pone en bajo
191 ENDIF
192
193 IF $4.2 == ON
194 #$4.2 se pone en alto con el botón de ingreso del parámetro carga de la probeta
195 #de la pantalla PROCESO
196 BITOFF $1.2
197 #$1.2 se pone en bajo
198 DELAY 500
199 #retardo de 500 milisegundos
200 BITOFF $4.2
```

Figura 164. Captura 5

```

201 #S4.2 se pone en bajo
202 ENDIF
203
204 #Línea 207 hasta 217: Reset del número de ciclos y la curva senoidal con el botón
205 #HOME de la PANTALLA DE PROCESO interactuando con el PLC (segmento 15 del código
206 #ladder)
207 IF S3.0 == ON
208 #S3.0 se pone en alto con el botón HOME de la pantalla PROCESO
209 BITON {HMI-PLC}2@Q1.3
210 DELAY 200
211 #retardo de 200 milisegundos
212 BITOFF {HMI-PLC}2@Q1.3
213 DELAY 200
214 #retardo de 200 milisegundos
215 BITOFF S3.0
216 #S3.0 se pone en bajo
217 ENDIF
218
219 #Línea 222 hasta 232: Reset del número de ciclos y la curva senoidal con el botón
220 #HOME de la pantalla de ENSAYO FINALIZADO interactuando con el PLC (segmento 15 del
221 #código ladder)
222 IF S3.1 == ON
223 #S3.1 se pone en alto con el botón HOME de la pantalla ENSAYO FINALIZADO
224 BITON {HMI-PLC}2@Q1.3
225 DELAY 200
226 #retardo de 200 milisegundos
227 BITOFF {HMI-PLC}2@Q1.3
228 DELAY 200
229 #retardo de 200 milisegundos
230 BITOFF S3.1
231 #S3.1 se pone en bajo
232 ENDIF
233
234 #Línea 238 hasta 256: Reset del número de ciclos, la curva senoidal y los
235 #parámetros ingresados de velocidad del motor, diámetro de la probeta y
236 #carga de la probeta con el botón HOME de la pantalla ALARMAS interactuando con el
237 #PLC (segmento 15 del código ladder)
238 IF S3.2 == ON
239 #S3.2 se pone en alto con el botón HOME de la pantalla ALARMAS
240 BITON {HMI-PLC}2@Q1.3

```

Figura 165. Captura 6

```

241 DELAY 200
242 #retardo de 200 milisegundos
243 BITOFF {HMI-PLC}2@Q1.3
244 DELAY 200
245 #retardo de 200 milisegundos
246 BITOFF $1.0
247 #$$1.0 se pone en bajo
248 BITOFF $1.1
249 #$$1.1 se pone en bajo
250 BITOFF $1.2
251 #$$1.2 se pone en bajo
252 BITOFF $3.2
253 #$$3.2 se pone en bajo
254 BITOFF $2.0
255 #$$2.0 se pone en bajo
256 ENDIF
257
258 #Línea 261 hasta 272: Reset del número de ciclos y la curva senoidal con el botón
259 #INICIAR de la pantalla PROCESO interactuando con el PLC (segmento 15 del código
260 #ladder)
261 IF $5.0 == ON
262 #$$3.2 se pone en alto con el botón INICIAR de la pantalla PROCESO
263 BITON $10.0
264 #$$10.0 se pone en alto cuando se pulsa INICIAR en la pantalla PROCESO
265 BITON {HMI-PLC}2@Q1.3
266 DELAY 200
267 #retardo de 200 milisegundos
268 BITOFF {HMI-PLC}2@Q1.3
269 DELAY 200
270 #retardo de 200 milisegundos
271 BITOFF $5.0
272 ENDIF
273
274 #Línea 277 hasta 287: Reset del número de ciclos y la curva senoidal con el botón
275 #MARCHA de la pantalla CURVA interactuando con el PLC (segmento 15 del código
276 #ladder)
277 IF $7.0 == ON
278 #$$7.0 se pone en alto cuando se pulsa MARCHA en la pantalla CURVA
279 BITON {HMI-PLC}2@Q1.3
280 DELAY 200

```

Figura 166. Captura 7

```

281 #retardo de 200 milisegundos
282 BITOFF {HMI-PLC}2@Q1.3
283 DELAY 200
284 #retardo de 200 milisegundos
285 BITOFF $7.0
286 #$$7.0 se pone en bajo
287 ENDIF

```

Figura 167. Captura 8

Gracias a esta codificación la pantalla táctil HMI interactúa correctamente con el variador de frecuencia y el PLC.

4.4.2 Variador de frecuencia

El controlador del variador de frecuencia no requiere de un software para programarse, se lo hace directamente a través del panel de control del variador (ver figura 92). Para este caso se aplican los siguientes parámetros:

Tabla 25.

Parámetros VDF programados

Display	Nombre	Valor	Descrpción
Frq	Control frecuencia	4	Comunicación RS-485
drv	Control arranque	3	Comunicación RS-485
ACC	Tiempo aceleración	1	Aceleración en segundos
dEC	Tiempo desaceleración	0.1	Desaceleración en segundos

4.4.3 PLC

El PLC se programó en lenguaje ladder y por sus características se simplificaron operaciones como cálculos matemáticos y le generación de la curva del esfuerzo flector. A continuación las instrucciones:

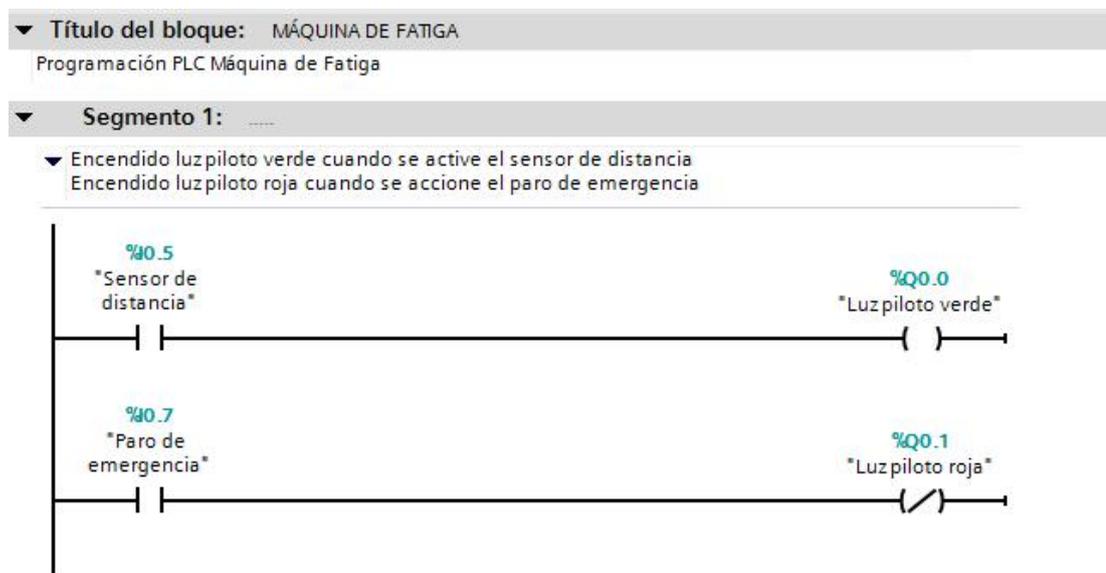


Figura 168. Título del programa y segmento 1

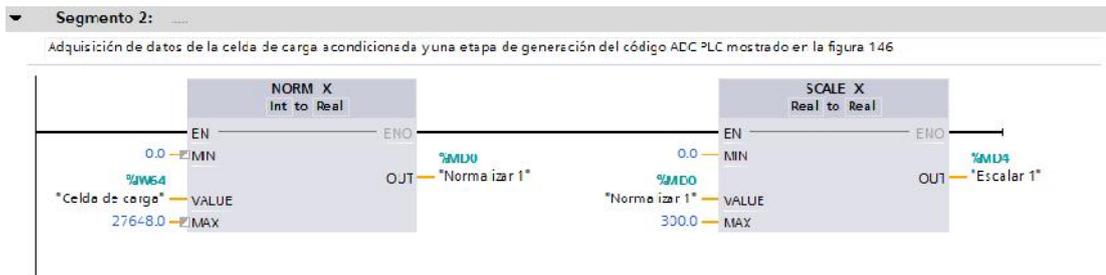


Figura 169. Segmento 2



Figura 170. Segmento 3

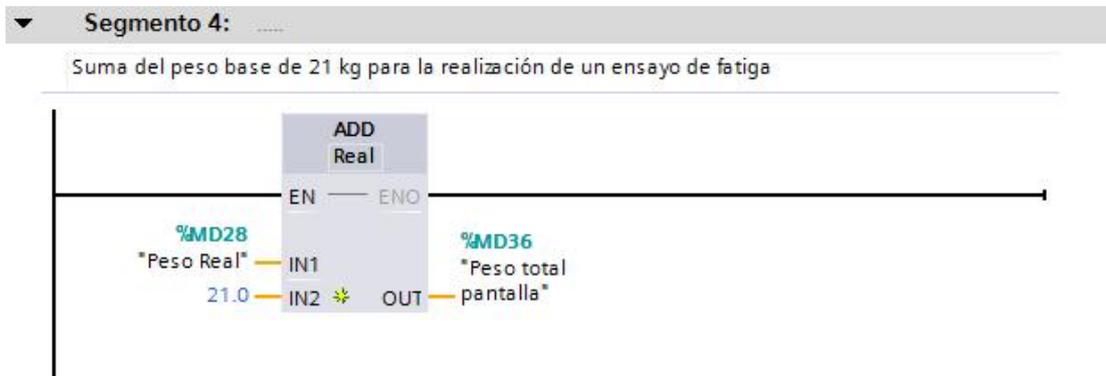


Figura 171. Segmento 4

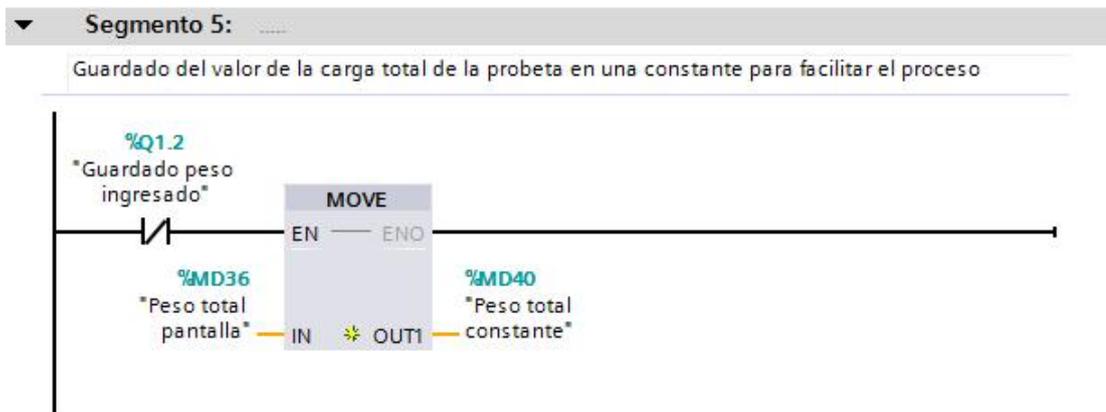


Figura 172. Segmento 5

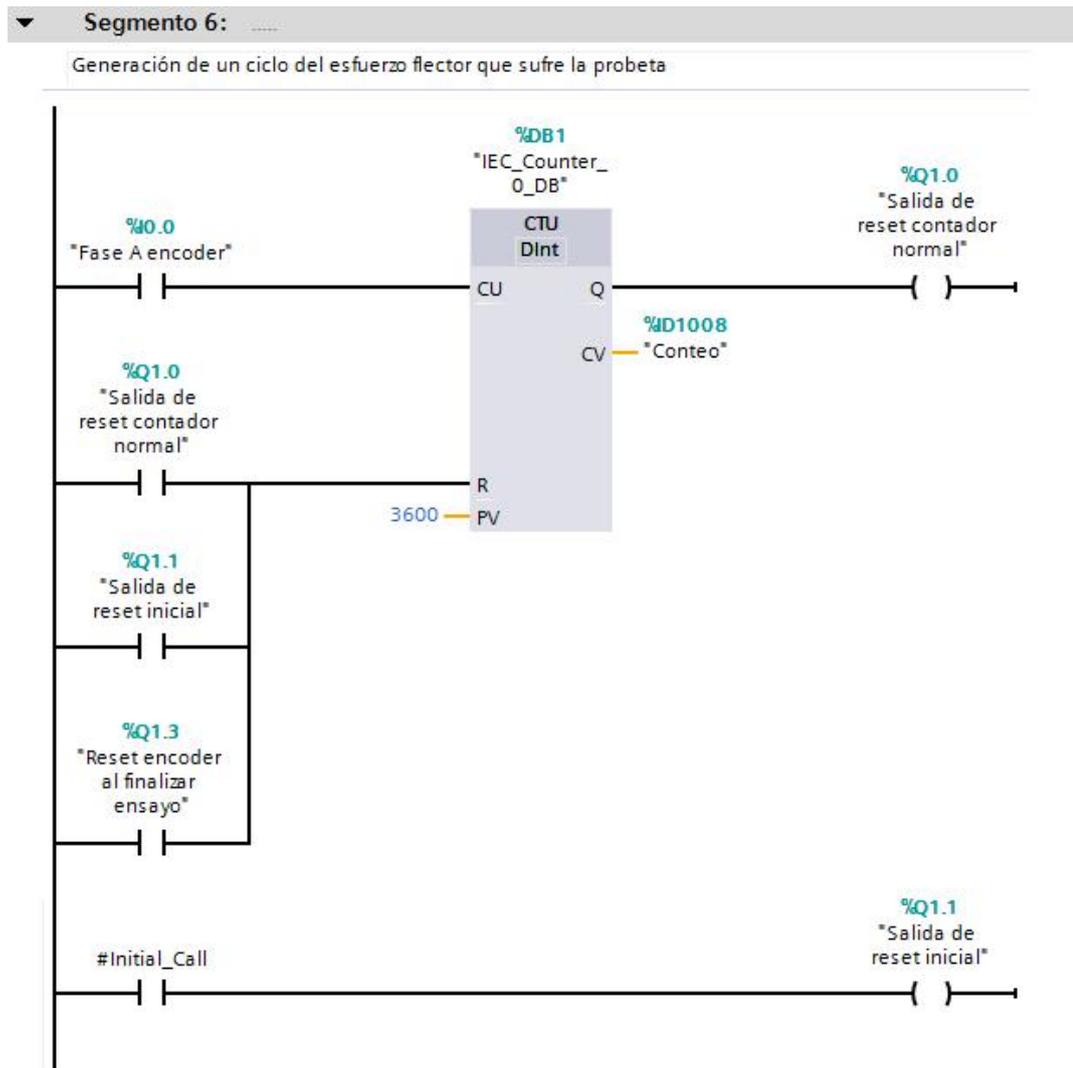


Figura 173. Segmento 6

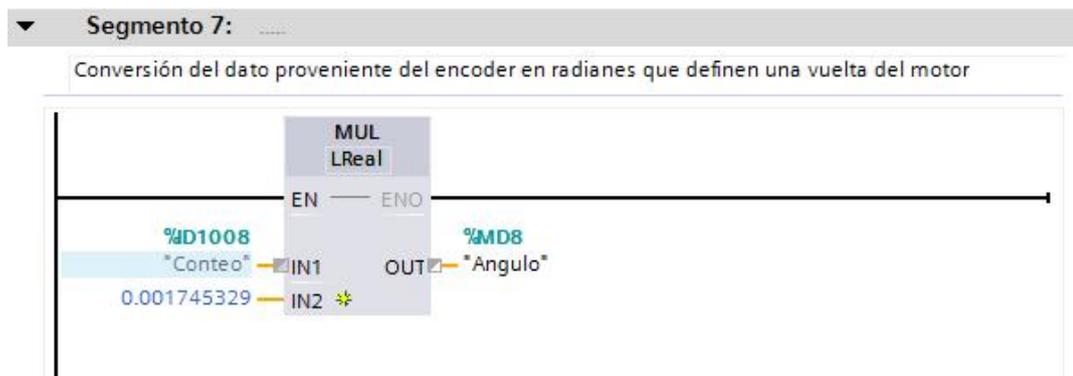


Figura 174. Segmento 7

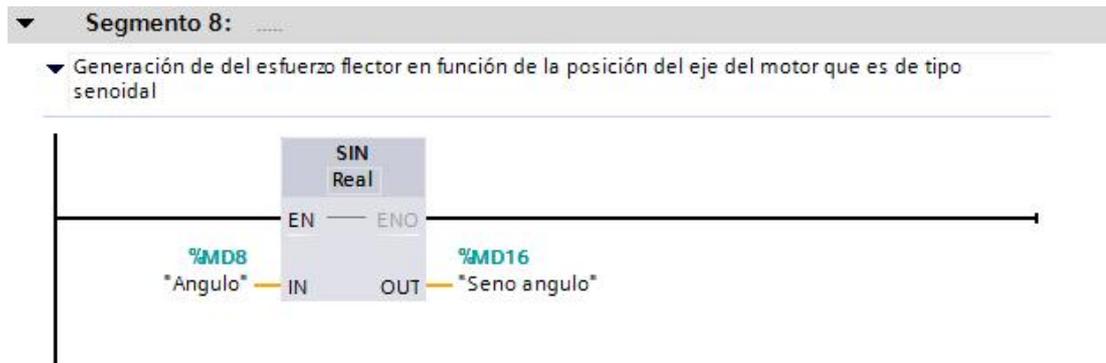


Figura 175. Segmento 8

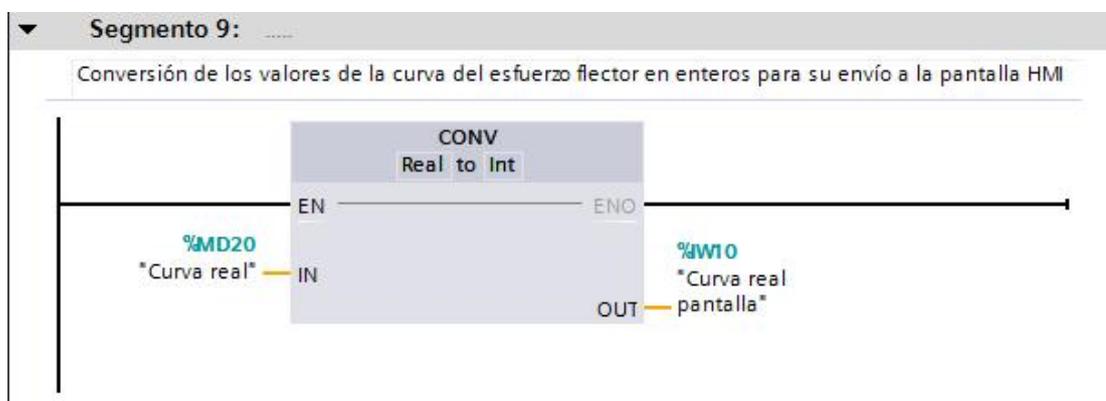


Figura 176. Segmento 9

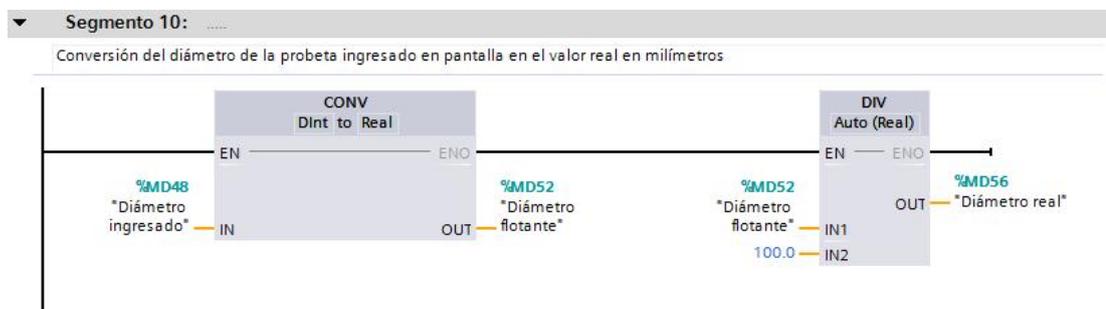


Figura 177. Segmento 10

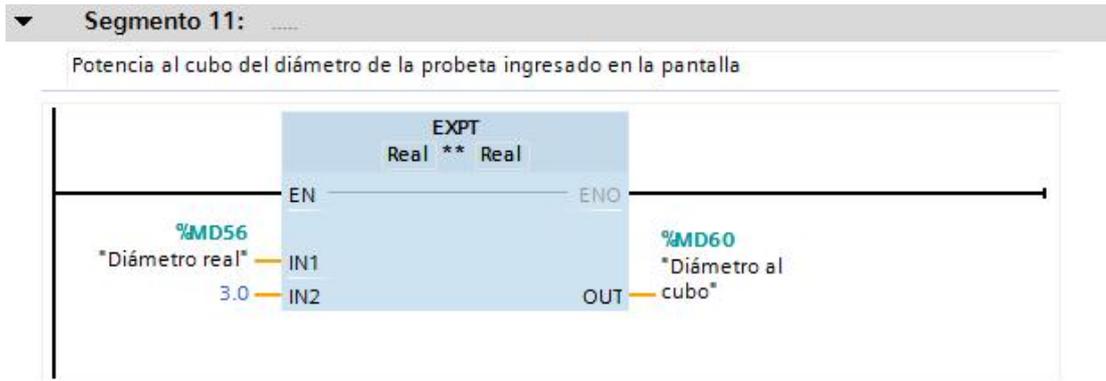


Figura 178. Segmento 11

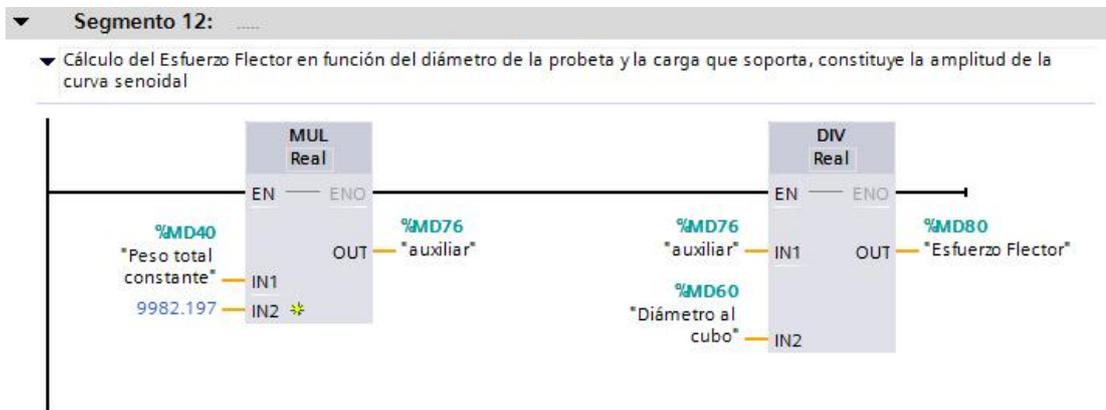


Figura 179. Segmento 12

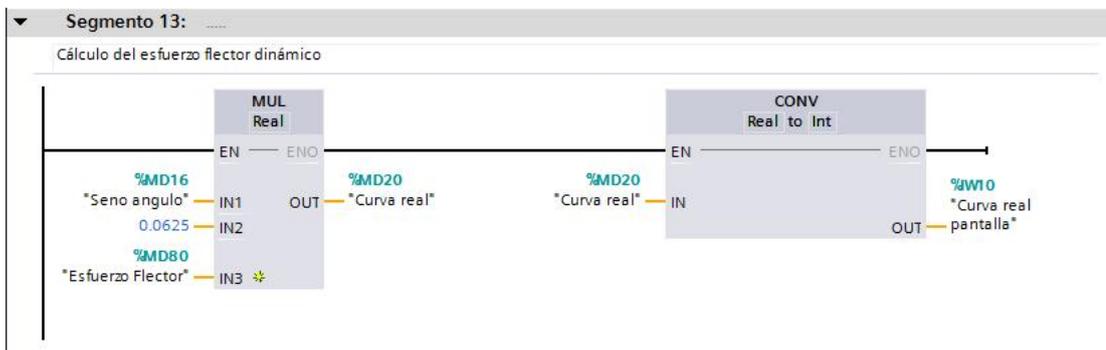


Figura 180. Segmento 13

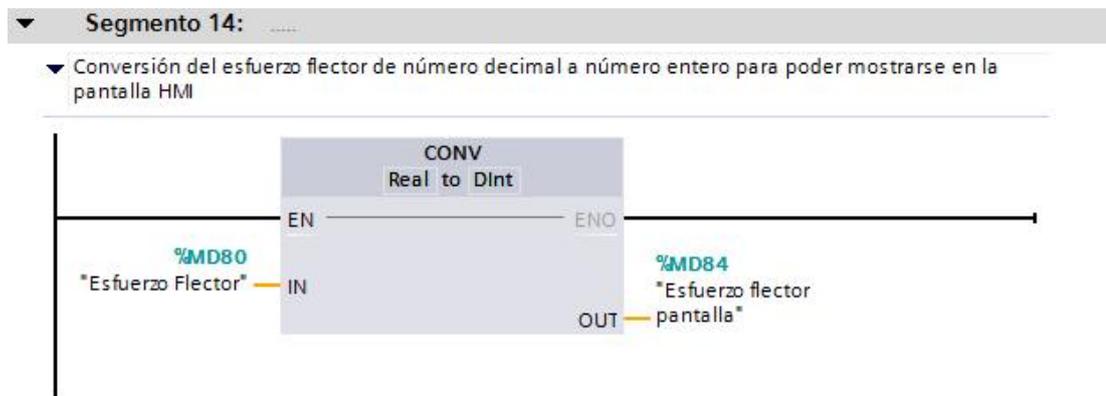


Figura 181. Segmento 14

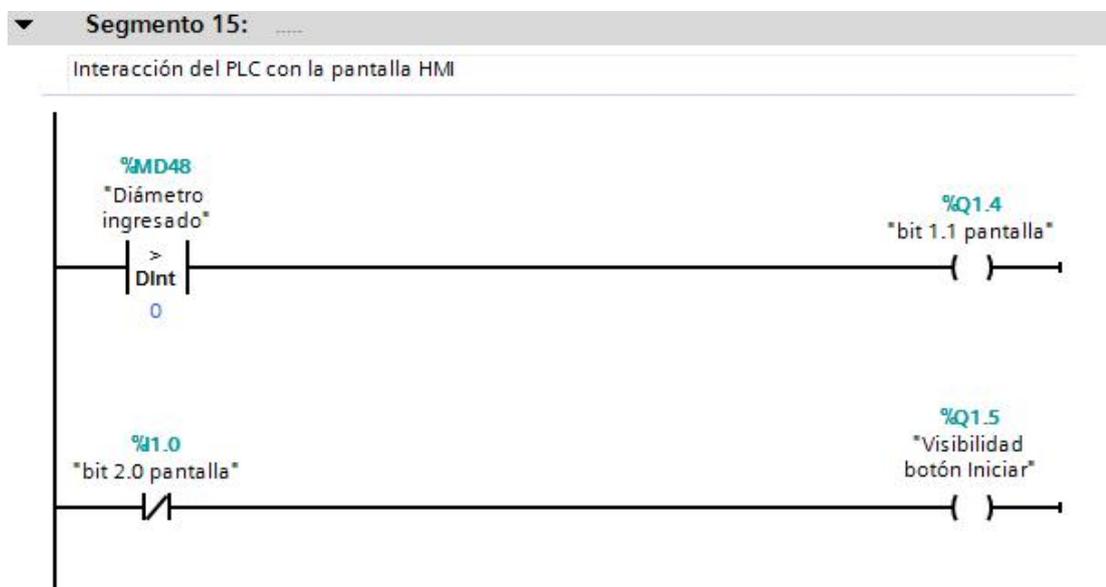


Figura 182. Segmento 15

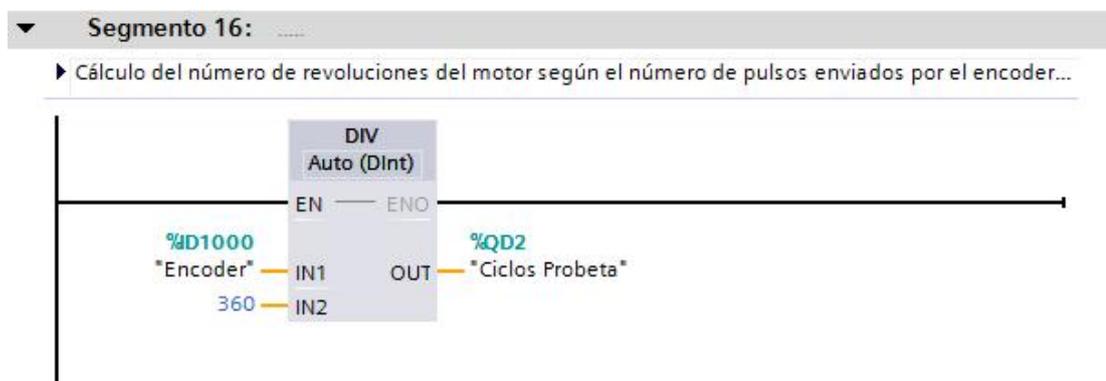


Figura 183. Segmento 16

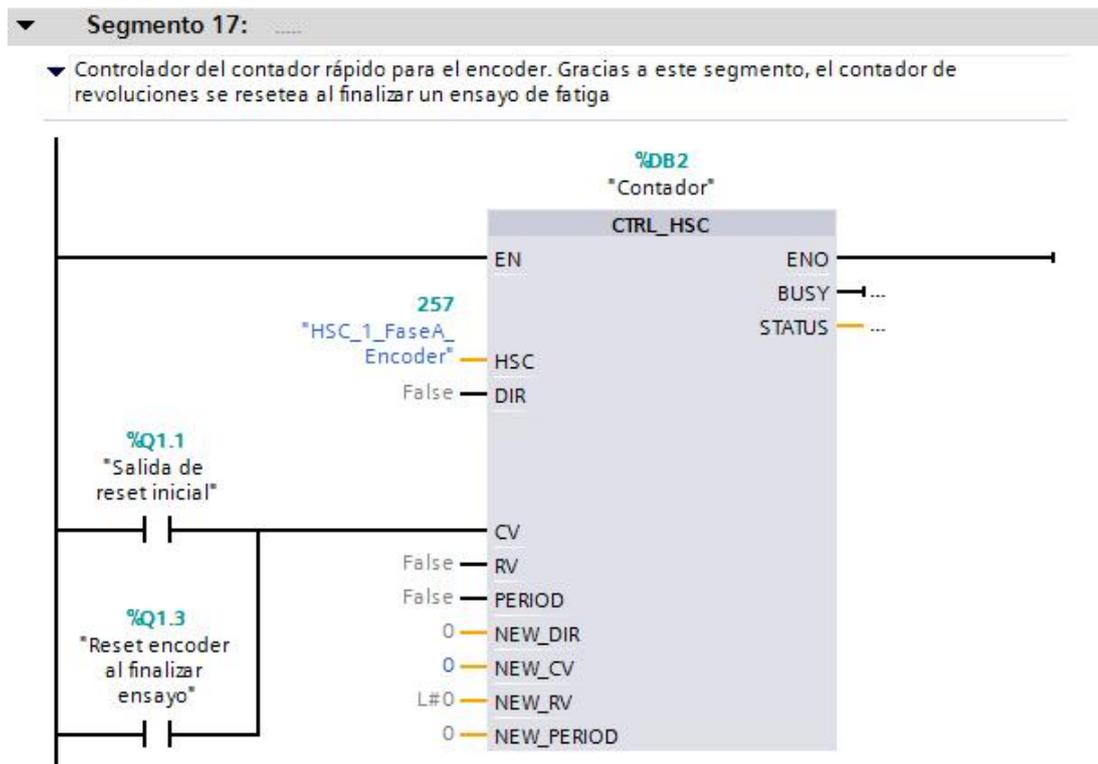


Figura 184. Segmento 17

4.4.4 Comunicación HMI-VDF

Para llevar a cabo la comunicación entre la pantalla táctil HMI y el variador de frecuencia se implementó el protocolo Modbus RTU a través del medio serial RS-485 con una velocidad de transmisión de 9600 baudios.

La trama o nexa establece la configuración del protocolo de comunicación, en este caso se efectuó la condición 8N1 que significa:

- **8:** Número de bits por paquete de transmisión
- **N:** Bit de paridad que se emplea como detector de errores en la transmisión, en este caso None (ningún)
- **1:** Número de bits de parada en un paquete de transmisión

Para observar el cable que se utilizó en esta comunicación dirigirse a la sección 4.2.6.2.

4.4.5 Comunicación HMI-PLC

Para efectuar la comunicación entre la pantalla táctil HMI y el PLC se implementó el protocolo Profinet característico del controlador lógico programable, la configuración de este protocolo es similar a la conexión en red a través de Ethernet así que se asignaron direcciones IP a los dos dispositivos actuantes que son:

- HMI: 192. 168. 0. 2
- PLC: 192. 168. 0. 3

Adicionalmente se especificó la dirección IP 192. 168. 0. 1 para el programador del PLC. Para observar el cable que se utilizó en esta comunicación dirigirse a la sección 4.2.6.2.

4.4.6 Comunicación VDF-PLC

No existe comunicación directa entre el variador de frecuencia y el PLC que son esclavos en la red industrial implementada, sino que ésta se produce a través de la pantalla táctil HMI que actúa como nexo entre ellos a la vez que resulta el maestro de esta red industrial. Para una mayor comprensión de este tema dirigirse a la sección 3.4.1.

—

4.5. Pruebas y resultados

A través de las normas realizadas por la ASTM (American Society for Testing and Materials) puntualmente la ASTM E606 y E466 destinadas a la realización de ensayos de fatiga se procedió a realizar la verificación tanto de parámetros y procedimientos importantes dentro del ensayo.

4.5.1. Norma ASTM E606

Esta norma está enfocada a los laboratorios de pruebas de materiales la cual se utiliza normalmente para pruebas de resistencia de bajos ciclos,

donde los componentes mecánicos están sometidos a deformaciones plásticas cíclicas que causan el fallo por fatiga dentro de un corto número de ciclos como se mencionó anteriormente.

Según la ASTM E606 las pruebas de fatiga de bajos ciclos se realizan usando una máquina de ensayos de resistencia de tensión-compresión. El material que se desea analizar se mecaniza primero en probetas de ensayo cilíndricas de diámetro uniforme o en forma de reloj de arena. Las muestras se cargan en el marco de ensayo y se someten a un esfuerzo repetido bajo una velocidad de deformación constante.

4.5.1.1. Parámetros para realización del ensayo

Un ensayo de fatiga de bajos ciclos debe cumplir lo siguiente:

- El ensayo se debe ejecutar a no más de 100.000 ciclos.
- La frecuencia de ensayo varía entre 1Hz y 5Hz dependiendo del material y requisitos.
- La norma ASTM E606 recomienda realizar pruebas en al menos 10 muestras para ganar confianza estadística en las curvas de S-N.

4.5.2. Norma ASTM E466

Dicha norma se aplica típicamente a ensayos de fatiga de ciclos altos (1.000.000 o superior) y amplitud constante en materiales metálicos.

4.5.2.1. Parámetros para realización del ensayo

Este tipo de ensayo se debe realizar con las siguientes consideraciones:

- La máquina debe tener un sistema de monitoreo de la fuerza aplicada (carga).
- La alineación de la probeta es de mucha importancia y esta debe ser verificada antes de realizarse la prueba.

- Las probetas se prueban a frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 100 Hz dependiendo de los tipos de materiales y condiciones ambientales.
- Se deben realizar los ensayos suficientes con diferentes valores de carga para poder tener suficientes puntos en el momento de realizar la curva S-N.

4.5.3. Normas aplicables a ensayos de fatiga

4.5.3.1. American Society for Testing and Materials (ASTM)

- **E206:** Definiciones de términos que Relacionan el ensayo de fatiga y el Análisis Estadístico de Datos de Fatiga.
- **E467:** Práctica recomendada para la Comprobación de Cargas Dinámicas de Amplitud Constante en una Máquina de Ensayos de Fatiga.
- **E468:** Práctica recomendada para la Presentación de Resultados de la Prueba de Fatiga de Amplitud Constante para los Materiales Metálicos.
- **E739-91:** Obtención de curva S-N.

4.5.3.2. Una Norma Española (UNE)

UNE 7118: Clases y ejecución de los ensayos de fatiga de materiales metálicos.

4.5.4. Velocidad del motor

Se definió que la velocidad mínima de operación del motor es de 200 RPM, para lo cual se realizó un ensayo a esta velocidad aplicando la máxima carga en el portapesas de 16 kg.

4.5.5. Funcionamiento sensor de distancia

Se implementó un sensor inductivo de proximidad para detectar la caída del eje que se produce al romperse la probeta, dado el alcance tan pequeño del mismo, se probó realizando un ensayo a máxima velocidad

(1680 RPM) y máxima carga en el portapesas (16 kg) y se constató que al romperse la probeta y posterior caída del eje, éste no toca al sensor. Por lo tanto se instaló el mismo a una distancia de 11 mm con una tolerancia de 0.4 mm.

Además se limitó el área de acción del sensor instalando guías en el eje de la máquina de forma que éste no se traslade en sentido horizontal, dirigirse a planos mecánicos en Anexos y verificar el acondicionamiento mecánico del sensor de distancia.

4.5.6. Funcionamiento acondicionamiento celda de carga

En vista a la baja respuesta de la celda de carga, fue preciso construir un acondicionamiento de señales, se obtuvo la curva de salida respecto a entrada de la celda acondicionada y se efectuó la linealización en el PLC, obteniéndose un sensado de hasta 16.2 kg con resolución de 0.1 kg (ver figura 146).

4.5.7. Funcionamiento encoder

En vista de una respuesta de alta frecuencia por parte del encoder, 10080 pulsos por segundo a máxima velocidad del motor en este caso, es preciso utilizar un PLC con entradas de alta frecuencia y realizar la correcta adquisición de datos. El objetivo principal del encoder es de realizar el conteo de revoluciones que hace el motor así que se hicieron pruebas tomando el tiempo de operación del motor y de acuerdo a su velocidad se despeja el número de revoluciones dado. Como resultado se obtuvo que el encoder trabaja adecuadamente para la aplicación de conteo de revoluciones del motor.

4.5.8. Funcionamiento contacto paro de emergencia

La señal que atraviesa este contacto es de 24 VDC, sin embargo se implementó uno de 220 VAC por la dificultad de encontrar en el mercado. Se

realizaron pruebas pertinentes y se concluyó que el contacto para 220 VAC trabaja correctamente con 24 VDC.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se implementaron dos sistemas de control; un control de arranque y velocidad del motor en lazo abierto y un control de detención de la máquina al finalizar el ensayo que es en lazo abierto.
- Se implementó un variador de frecuencia que ejerce el control de arranque y velocidad del motor, además de protegerlo ante una sobrecarga, cortocircuito, sobretensión y/o baja tensión.
- Se implementó un PLC con salidas de relé que soporte entradas analógicas de 0 a 10 voltios y entradas digitales de alta frecuencia.
- Se implementó una pantalla táctil HMI a color.
- El variador de frecuencia, el PLC y la pantalla táctil HMI constituyen una red industrial de arquitectura maestro-esclavo. La HMI que actúa como maestro se comunica con el variador a través de RS-485 y con el PLC por Ethernet.
- Se realizó el reemplazo del motor monofásico presente en la máquina por un motor trifásico con mejores prestaciones en temas de mantenimiento y control.
- Se colocaron elementos electrónicos para ejercer el control y monitoreo de la máquina.
- La caja de control se empotró en la pared cerca de la máquina, otorgando ergonomía para el usuario.

- Se mecanizó un bocín en el acoplamiento mecánico para conectar el eje del motor con el eje de la máquina.
- Se diseñó y construyó un acoplamiento mecánico para conectar el eje del encoder al eje del motor. El encoder es un sensor que permite medir la velocidad y el número de revoluciones o ciclos que da el motor.
- El sensor inductivo de proximidad que detecta la finalización del ensayo, fue colocado en una placa y sujetado a la estructura de la máquina.
- La celda de carga que sensa la carga aplicada en el portapesas, fue sujeta a través de dos ejes roscados.
- La tarjeta electrónica del acondicionamiento de la celda de carga se construyó con un amplificador operacional de instrumentación, AD620, y un amplificador operacional LM358.
- En la pantalla HMI se opera la máquina, se visualizan las variables de velocidad del motor, frecuencia, esfuerzo flector y número de ciclos. Además se grafica la curva del esfuerzo flector en función del tiempo.
- La velocidad de operación del motor es de 200 a 1680 RPM establecida por el usuario.
- Se varió la capacidad de la máquina para operar con peso colgante de 50 a 37.2 kg lo que significa que el portapesas se debe cargar con un máximo de 16.2 kg.
- El sensor inductivo debe estar instalado a una distancia de entre 10.6 y 11 mm respecto al eje. Esta medición se realiza cuando se encuentra instalada una probeta y por ello el eje de la máquina está correctamente alineado.

- Se registraron ensayos satisfactorios con materiales como el acero y duraluminio. No se recomienda realizar ensayos con materiales como el hierro fundido y aluminio.
- Para garantizar el éxito de un ensayo se recomienda colocar la probeta con el uso de un nivel para así obtener un correcto alineamiento de los ejes.
- Se recomienda el uso de la máquina utilizando el manual de usuario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen-Bradley. (s.f.). *Sensores de proximidad inductivos*. Obtenido de <https://booksmovie.org/similar-pdf-proximity-sensors-and-limit-switches-rockwell.html>
- Analog Devices . (11 de 01 de 2014). *AD620*. Obtenido de <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- Araguillin López, R. D., & Mejía Cholo, C. A. (2010). *Diseño de un Sistema de Control y Automatización de una Máquina Axial-Torsional de Ensayo de Materiales*. Quito-Ecuador. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2387/1/CD-3121.pdf>
- Avilés, R. (2015). *Métodos de cálculo de fatiga para ingeniería*. Madrid-España: Ediciones Paraninfo. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=8BGyBgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. México DF-México: Pearson Educación.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México DF-México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A.
- Delta. (s.f.). *DOP-B03 DOPB03S211/B03E211 Instrunction Sheet*. Obtenido de <http://induprogres.pl/media/files/download/7017/delta-ia-hmi-dop-b03s211-e211-q-tc-en-sc-tur-20140618.pdf>
- Delta. (s.f.). *Technical Datasheet CliQ DIN Rail Power Supply*. Obtenido de <http://www.deltapsu.com/products/download/Datasheet/DRP024V060W1AZ>
- Diario El Universal. (27 de Junio de 2000). El tornillo, invento de origen griego. Obtenido de <http://archivo.eluniversal.com.mx/estilos/6903.html>
- EATON. (s.f.). *Arranque y control de motores trifásicos asíncronos*. Obtenido de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&c>

d=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiLgcCNpMLQAhXH5yYKHe2UC
 cMQFggZMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.moeller.es%2Fdescarga.p
 hp%3Ffile%3Dsoporte%2F12%2FIT-
 EE09.pdf&usg=AFQjCNEOrLb5xbhtMW6g3C89NUDPQb2qtQ&sig2=
 H

Edwards, W. G. (Productor), & Mole, B. (Dirección). (2007). *Grandes descubrimientos, Los robots de la antigüedad* [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=oZzY37BeORs>

Escuela Colombiana de Ingeniería. (2011). *Curso de Materiales*.

General Cable cablec. (s.f.). *Catálogo de productos comerciales*. Obtenido de http://www.kywi.com.ec/files/GENERAL_CABLE_1.pdf

Guru, B. S., & Hiziroglu, H. R. (2003). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. México DF-México: Alfaomega.

Jiménez, G. (2009). *Rediseño y automatización de la máquina de ensayo de fatiga por flexión rotativa*. Aragua. Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/ENSAYOS%20DE%20MATERIALES/maquina%20de%20ensayo%20de%20fatiga..pdf>

Kosow, I. L. (1993). *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. México DF-México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

LS. (s.f.). *Manual de Usuario SV-iE5*. Obtenido de <http://www.equitrans96.es/assets/sv-ie5-manual.pdf>

LS. (s.f.). *Mini Interruptores Termomagnéticos e Interruptores diferenciales*. Obtenido de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0ahUKEwjnmcSAXsLQAhUK5CYKHXdYAVgQFgghMAE&url=http%3A%2F%2Fdoc.vmc.es%2Fdocuments%2Fdownload%2F1649&usg=AFQjCNF2GIZ9nRtQqZoIEfUWwbgIU21uOA&sig2=uKohAn4eh2aS2EOLr6xB>

Marco Esteban, E. (2010). *Metodología para el Análisis a Fatiga Mediante el Código Pro Engineer: Aplicación a un Eje Ferroviario*. Madrid-España: Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de <http://e->

archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10852/PFC_EVA_MARCO.pdf?sequence=1

MaterialsScience2000 (Dirección). (2014). *Fatigue Test* [Película]. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV_E

Mecatrónica ESPE. (Noviembre de 2016). *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Obtenido de Ingeniería Mecatrónica: <http://mecatronica.espe.edu.ec/informacion-general/>

Ministerio de Educación y Deportes de Argentina. (Octubre de 2016). *Presidencia de la Nación*. Obtenido de Educ.ar: <http://www.educ.ar/recursos/ver?id=90679>

Montenegro González, A. (1997). *Historia del Antiguo Continente*. Bogotá-Colombia: Norma.

MOPTKaHo (Dirección). (2009). *FATIMAT Rotating Bending Machine prototype, first demo* [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=52knsY5AWIc>

Nacional de Fabricantes Eléctricos Asociación. (1998). *Motores y Generadores*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/jesusgomez39750/norma-nema-completa>

Narváez Mejía, N. D., & Terán Rosero, A. F. (2004). *Diseño y Construcción de una Máquina de Ensayo de Metales Sometidos a Fatiga por Flexión Rotativa con Capacidad de 30 kgf-m para el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la FIM-E*. Sangolquí-Ecuador: ESPE.

O'Connor, J. J., & Robertson, E. F. (Abril de 1999). *MacTutor History of Mathematics archive*. Obtenido de <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/Biographies/Heron.html>

Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. México DF-México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

Orejuela Sandoval, L. E. (2006). *Diseño y Construcción de una Máquina de Fatiga Automatizada para el Estudio de Materiales con Memoria de Forma*. Bucaramanga-Colombia. Obtenido de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/handle/123456789/5725>

- Pavón López, P. J. (2015). *Diseño y Construcción de un Equipo para Prácticas de Flexión de Vigas para el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Sangolquí-Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9722/1/T-ESPE-048721.pdf>
- Pérez, J. (2015). *Prácticas a realizar, Mecánica de Materiales II*. Sangolquí-Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Rubbiolo, M., Villarreal, C., Gajardo, A., Hinalaf, M., Stephan, V., & Zambello, I. (2016). *Motores y Generadores*. Obtenido de MYG.la: <http://www.motoresygeneradores.com/motores/eficiencia/163-eficiencia-en-motores-electricos-que-es>
- Sánchez, F. M., Millán, F. S., Palou, J., Rodríguez, F., Esquena, S., & Villavicencio, H. (Febrero de 2007). *SciELO España*. Obtenido de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0210-48062007002200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Schneider Electric. (s.f.). *Contactores*. Obtenido de http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/33000/FA33498/es_ES/Categorias%20de%20empleo.pdf
- Siemens. (s.f.). *Simatic S7 Controlador programable S7-1200 Manual de sistema*. Obtenido de <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>
- Stanford University. (23 de Agosto de 2016). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Obtenido de <http://plato.stanford.edu/entries/archytas/>
- Sumelec. (2014). *Lista de precios 2014*. Obtenido de <http://www.sumelec.net/assets/lista-de-precios-sumelec-2014-en-baja.pdf>
- Universidad Tecnológica de Pereira. (03 de Julio de 2016). *Universidad Tecnológica de Pereira*. Obtenido de <http://www.utp.edu.co/~lvanegas/dis1/Cap5.pdf>

- Vanegas Useche, L. (2016). Cargas Variables-Teoría de Fatiga. En L. Vanegas Useche, *Diseño I (libro guía)* (págs. 1-7). Pereira-Colombia.
- WEG. (s.f.). *W22 Motor Eléctrico Trifásico Catálogo Técnico Mercado Latinoamericano*. Obtenido de <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-latinoamericano-50024297-catalogo-espanol.pdf>
- Yachou, S. F. (2014). *Evaluación de estándares HMI/SCADA y Aplicación de la guía GEDIS a los Sistemas SCADA del NAP (Network Access Point) de Canarias*. La Laguna-España: Universidad de La Laguna. Obtenido de [http://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/657/Evaluacion%20de%20estandares%20HMI%20Aplicacion%20de%20la%20guia%20GEDIS%20a%20los%20Sistemas%20SCADA%20del%20NAP%20\(Network%20Access%20Point\)%20de%20Canarias..pdf?sequence=1](http://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/657/Evaluacion%20de%20estandares%20HMI%20Aplicacion%20de%20la%20guia%20GEDIS%20a%20los%20Sistemas%20SCADA%20del%20NAP%20(Network%20Access%20Point)%20de%20Canarias..pdf?sequence=1)

ANEXOS