



**Diseño e implementación de un módulo didáctico de un clasificador industrial para la discretización  
de probetas por medio de sensores digitales y visión artificial**

Almeida Huilcapi, Santiago Alejandro y Muñoz Lucero, Mishelle Estefanía

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero/a en Mecatrónica

Ing. Cortez Pazmiño, Byron Hernán, Msc

18 de agosto del 2023

## Tesis\_Copyleaks\_Almeida&Muñoz.pdf

### Scan details

Scan time:  
August 18th, 2023 at 21:13 UTC

Total Pages:  
161

Total Words:  
40120



BYRON HERNAN CORTEZ  
PAZMINO

### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	1.2%	494
Minor Changes	1.2%	488
Paraphrased	2.1%	842
Omitted Words	0%	0

### AI Content Detection



Text coverage  
 AI text  
 Human text

### Plagiarism Results: (47)

#### PF\_O1LO304\_S6.pdf

0.6%

<https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24819w/o1lo3...>

jesus lara monroy

Gestión de Inventarios y Almacenamiento MATERIA: GESTIÓN DE INVENTARIOS Y ALMACENAMIENTO SEMANA 6 TEMAS SEMANA 6: a) Sistema...

#### Tipos de sorters o clasificadores que deberías cono...

0.6%

<https://blog.gieicom.com/tipos-de-sorters-o-clasificadores-q...>

Nosotros Productos Sistema de clasificación (SORTER) Shoe Sorter ...

#### TM241CE40T - Schneider - Modicon - FCM Solutions ...

0.5%

<https://www.fcmsolutionsperu.com/products/tm241ce40t>

Ir directamente al contenido Buscar ...



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

### Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un módulo didáctico de un clasificador industrial para la discretización de probetas por medio de sensores digitales y visión artificial”** fue realizado por el señor Almeida Huilcapi Santiago Alejandro y la señorita Muñoz Lucero Mishelle Estefanía; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de agosto de 2023



Ing. Cortez Pazmiño Byron Hernán, Msc

C.C 1714471081



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, Almeida Huilcapi Santiago Alejandro y Muñoz Lucero Mishelle Estefanía, con cédulas de ciudadanía No. 0604961706 y No. 1723035786 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un módulo didáctico de un clasificador industrial para la discretización de probetas por medio de sensores digitales y visión artificial**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teórico, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciados en las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

Sr. Santiago Alejandro Almeida Huilcapi  
C.C. 0604961706

Srta. Mishelle Estefanía Muñoz Lucero  
C.C. 1723035786



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

#### Autorización de Publicación

Nosotros, Almeida Huilcapi Santiago Alejandro y Muñoz Lucero Mishelle Estefanía, con cédulas de ciudadanía No. 0604961706 y No. 1723035786 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un módulo didáctico de un clasificador industrial para la discretización de probetas por medio de sensores digitales y visión artificial**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

Sr. Santiago Alejandro Almeida Huilcapi  
C.C. 0604961706

Srta. Mishelle Estefanía Muñoz Lucero  
C.C. 1723035786

### **Dedicatorias**

Dedico este trabajo a mi familia, empezando por mi padre quien me ha mostrado su amor mediante su acompañamiento e interés durante la realización del mismo, me siento dichoso de que me haya inculcado virtudes como la responsabilidad, disciplina y fortaleza mediante su ejemplo, a mi madre cuyo amor y cariño incondicional la convierten en mi ángel de la guarda y maestra de vida enseñándome a llevar mis acciones con templanza, pensamiento crítico y justicia y a mi hermana que con su alegría y bondad me ha ayudado a ver la vida de una manera positiva y quien es fuente de inspiración por su inteligencia, responsabilidad y liderazgo.

Almeida Huilcapi, Santiago Alejandro

Dedicado a mi madre Isabel Lucero y mi familia quienes han sido un impulso y apoyo fundamental para la culminación de esta etapa universitaria. A mi enamorado Pablo Arturo quien me ha brindado su compañía incondicional en las buenas y las malas y quien ha sido testigo del esfuerzo y dedicación constante que ha dado como fruto alcanzar este logro.

Muñoz Lucero, Mishelle Estefanía

## Agradecimientos

Agradezco a mi familia por ser mi fortaleza y quienes me han apoyado a seguir adelante en el camino que he elegido, igualmente a los miembros de la comunidad universitaria, compañeros, abogada, autoridades y docentes, sobre todo a los ingenieros David Loza y Byron Cortez por haberme permitido desarrollar mi proyecto de titulación con ellos, brindarme las herramientas necesarias para culminarlo y por guiarme con profesionalismo y comprensión.

Almeida Huilcapi, Santiago Alejandro

Agradezco a Dios por darme salud y vida a mí y a mis seres queridos. A mi madre Isabel Lucero por su esfuerzo y sacrificio por darme la educación y nunca rendirse, por inculcarme valores de honestidad, sencillez y responsabilidad, los cuales me han permitido llevar siempre la frente en alto, logrando mis objetivos sin dañar a nadie. Le agradezco sobre todo por su cariño y apoyo que me han permitido alcanzar este logro y ser una persona de bien.

A mi padre, mis hermanas y sobrinos que han estado pendientes de mi bienestar y futuro. A mi enamorado Pablo Arturo quien con su cariño, compañía y palabras me ha sabido aconsejar y brindar palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

A la honorable Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por haberme acogido con sus saberes de estudio y formar en mí una profesional con ética.

Al Ing. David Loza e Ing. Byron Cortez por sus consejos que han sido una guía durante el desarrollo del proyecto y a su vez como preparación para el futuro. Por su paciencia, tiempo y experiencia que hicieron posible la culminación del proyecto. También por demostrar siempre su solidaridad, apoyo y comprensión fomentando un ambiente de cordialidad y fraternidad.

A mis amigos, compañeros y todas aquellas personas que han hecho de esta etapa académica un diario de recuerdos y vivencias que me han hecho crecer como persona.

Muñoz Lucero, Mishelle Estefanía

**índice de contenidos**

<b>Dedicatorias.....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>7</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>26</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>27</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>28</b>
<b>Generalidades.....</b>	<b>28</b>
Introducción.....	28
Antecedentes.....	29
Trabajos internacionales.....	29
Trabajos nacionales.....	32
Análisis comparativo.....	34
Planteamiento del problema.....	34
Justificación e importancia.....	35
Objetivos.....	36
Objetivo general.....	36
Objetivos específicos.....	36
Alcance.....	37
Estructura del documento.....	37
<b>Capítulo II.....</b>	<b>39</b>

<b>Fundamentos teóricos .....</b>	<b>39</b>
Líneas de producción industrial .....	39
Banda transportadora .....	40
Ventajas .....	40
Desventajas .....	41
Aplicaciones .....	41
Partes .....	41
Tipos de banda transportadora .....	43
Sistemas de dosificación industrial .....	44
Sistemas de clasificación industrial.....	45
Visión artificial para clasificación en la industria .....	49
Componentes de un sistema de clasificación por visión artificial .....	49
Funcionamiento de un sistema de clasificación por visión artificial.....	50
Aplicaciones de la visión artificial .....	52
Controladores lógicos programables .....	52
Sistemas de comunicación .....	54
Modelo OSI .....	54
Modelo TCP/IP .....	55
OPC Unified Architecture (UA).....	56
Comunicación Cliente-Servidor OPCUA .....	57

	10
Resumen .....	59
<b>Capítulo III .....</b>	<b>60</b>
<b>Diseño Mecatrónico .....</b>	<b>60</b>
Definición de las necesidades .....	60
Definición de los requerimientos.....	61
Planificación del producto .....	62
Diseño general .....	64
Diseño del subsistema de transporte .....	69
Selección del método de transporte.....	69
Cálculos de probetas.....	71
Selección de la cinta transportadora .....	72
Selección de los rodillos .....	74
Selección del método de tensado.....	77
Cálculos del motor .....	78
Dimensionamiento de elementos de protección del motor .....	83
Análisis de la cinta transportadora .....	86
Diseño de la estructura.....	92
Análisis de la flecha.....	98
Diseño del subsistema dosificador .....	113
Selección del mecanismo de dosificación.....	113

Dimensionamiento del actuador neumático .....	116
Selección de electroválvulas .....	119
Geometría de los componentes.....	120
Control del subsistema dosificador.....	124
Diseño del subsistema clasificador .....	128
Selección de la ventosa.....	128
Selección del cilindro neumático .....	132
Cálculo del consumo de aire .....	132
Selección de electroválvulas .....	132
Selección de los materiales del subsistema de clasificación .....	133
Diseño de la estructura del subsistema de clasificación.....	134
Selección del mecanismo de transmisión de movimiento .....	135
Dinámica del subsistema de clasificación .....	137
Selección del motor .....	141
Análisis estático del subsistema de clasificación .....	142
Control del subsistema de clasificación .....	145
Diseño del subsistema de reconocimiento .....	149
Selección del sensor para clasificar según la naturaleza de la probeta.....	149
Selección de los componentes para clasificar según sus características visibles .....	150
Diseño de la estructura del subsistema de reconocimiento.....	151

	12
Análisis estático de la estructura del subsistema de reconocimiento.....	153
Control del subsistema de reconocimiento .....	156
Análisis estático de la banda transportadora .....	158
Resumen .....	162
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>165</b>
<b>Implementación.....</b>	<b>165</b>
Construcción del subsistema de transporte .....	165
Selección de los sensores del módulo didáctico.....	168
Construcción del subsistema de dosificación .....	170
Construcción del subsistema de clasificación .....	173
Construcción del subsistema de reconocimiento.....	179
Diseño e implementación del tablero de potencia y control .....	181
Selección de elementos de protección .....	182
Colores de cables .....	182
Borneras .....	184
Selección de relés.....	184
Selección del PLC.....	185
Construcción del tablero.....	189
Implementación neumática .....	192
Control del motorreductor - Variador de frecuencia.....	197

Programación del PLC .....	199
Programación del subsistema de reconocimiento .....	209
Importación de librerías.....	211
Definición de las variables y directorio del OPCUA .....	211
Conexión entre el cliente y el servidor OPCUA.....	212
Cierre de sesión.....	213
Lectura de variables .....	213
Escritura de variables .....	213
Programación basada en eventos.....	214
Clasificación por colores .....	217
Clasificación por defectos .....	224
Resumen .....	228
<b>Capítulo V .....</b>	<b>231</b>
<b>Pruebas y resultados.....</b>	<b>231</b>
Definición de las pruebas.....	231
Prueba 1 .....	233
Prueba 2 .....	237
Prueba 3 .....	243
Pruebas con otro compresor .....	247
Prueba de independencia de Chi cuadrado .....	256

Prueba para el subsistema de dosificación .....	256
Prueba para el subsistema de clasificación .....	258
Resumen .....	259
<b>Capítulo VI .....</b>	<b>260</b>
<b>Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros .....</b>	<b>260</b>
Conclusiones .....	260
Recomendaciones .....	263
Trabajos futuros .....	264
<b>Bibliografía .....</b>	<b>265</b>
<b>Apéndices .....</b>	<b>270</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Necesidades del usuario establecidas y parámetros de Altshuller considerados. ....	60
<b>Tabla 2</b> Definición de los requerimientos .....	62
<b>Tabla 3</b> Casa de la calidad .....	63
<b>Tabla 4</b> Subsistemas del proyecto .....	64
<b>Tabla 5</b> Características generales del proyecto .....	65
<b>Tabla 6</b> Comparación entre los métodos de transporte de productos .....	69
<b>Tabla 7</b> Selección de las cintas según su tipo de superficie.....	72
<b>Tabla 8</b> Características de los rodillos comerciales .....	76
<b>Tabla 9</b> Tipos de dispositivos para tensado .....	77
<b>Tabla 10</b> Características del motorreductor .....	79
<b>Tabla 11</b> Selección del reductor RS-RT 40 con $i= 80$ para 2800 rpm .....	81
<b>Tabla 12</b> Selección del reductor RS-RT 40 con $i= 80$ para 1400 rpm .....	82
<b>Tabla 13.</b> Características físicas y eléctricas conductores de cobre para 600 V. aislado con policloruro de vinilo (PVC) 60°C resistente a la humedad.....	85
<b>Tabla 14</b> Valores del coeficiente de fricción entre los rodillos y la cinta según las condiciones de trabajo .....	87
<b>Tabla 15</b> Componentes de la estructura del subsistema de transporte .....	93
<b>Tabla 16</b> Componentes del soporte del motorreductor.....	94
<b>Tabla 17</b> Componentes del mecanismo de tensado.....	97
<b>Tabla 18</b> Parámetros en el factor de la condición superficial.....	106
<b>Tabla 19</b> Factor de confiabilidad correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga .....	108
<b>Tabla 20</b> Componentes de la opción A .....	114

<b>Tabla 21</b> Componentes de la opción B .....	115
<b>Tabla 22</b> Selección del mecanismo para dosificar probetas.....	116
<b>Tabla 23.</b> Componentes del subsistema dosificador .....	121
<b>Tabla 24</b> Cargas presentes en la base 1 .....	123
<b>Tabla 25</b> Nomenclatura empleada para el circuito de fuerza del subsistema dosificador.....	126
<b>Tabla 26</b> Nomenclatura del circuito de control del subsistema dosificador .....	127
<b>Tabla 27</b> Factor de seguridad según el tipo de elevación.....	129
<b>Tabla 28</b> Coeficiente de fricción .....	130
<b>Tabla 29</b> Componentes del subsistema clasificador.....	136
<b>Tabla 30</b> Comparación entre motores NEMA.....	142
<b>Tabla 31</b> Cargas presentes en el bastidor del subsistema de clasificación .....	143
<b>Tabla 32</b> Selección del tipo de sensor para identificar la naturaleza de la probeta.....	149
<b>Tabla 33</b> Características de la cámara seleccionada.....	150
<b>Tabla 34</b> Cargas presentes en el bastidor de la banda transportadora.....	158
<b>Tabla 35</b> Sensores a implementarse.....	169
<b>Tabla 36</b> Parámetros de piezas impresas en 3D .....	170
<b>Tabla 37</b> Características de piezas impresas en 3D del subsistema de clasificación.....	174
<b>Tabla 38</b> Características de las piezas impresas en 3D.....	180
<b>Tabla 39</b> Componentes eléctricos implementados en el tablero de potencia.....	182
<b>Tabla 40</b> Cables empleados para el circuito de potencia .....	183
<b>Tabla 41</b> Designación de colores para cables del circuito de control.....	183
<b>Tabla 42</b> Relés implementados.....	184
<b>Tabla 43</b> Principales especificaciones técnicas del PLC Modicon M241 TM241CE40T .....	186
<b>Tabla 44</b> Especificaciones técnicas del driver YS-DIV268N-5A .....	198

<b>Tabla 45</b> Secuencias empleadas para las pruebas .....	232
<b>Tabla 46</b> Orden de clasificación para cada prueba .....	232
<b>Tabla 47</b> Resultados de la prueba 1 de clasificación según su naturaleza (metal o no metal) .....	234
<b>Tabla 48</b> Resultados de la prueba 1 clasificadas según sus características físicas (color) .....	235
<b>Tabla 49</b> Resultados de la prueba 1, clasificación según sus características físicas (defecto) .....	236
<b>Tabla 50</b> Resultados de la prueba 2, clasificación según su naturaleza (metal o no metal) .....	238
<b>Tabla 51</b> Resultados de la prueba 2, clasificación según sus características físicas (color) .....	239
<b>Tabla 52</b> Resultados de la prueba 2, clasificación según sus características físicas (defecto) .....	241
<b>Tabla 53</b> Resultados de la prueba 2 según sus características físicas (defecto) con iluminación natural. .....	242
<b>Tabla 54</b> Resultados de la prueba 3, clasificación según sus características físicas (defectos) .....	243
<b>Tabla 55</b> Resultados de la prueba 3, clasificación según su naturaleza .....	245
<b>Tabla 56</b> Resultados de la prueba 3 al clasificar según sus características físicas (color) .....	246
<b>Tabla 57</b> Resultados de la prueba 1 con otro compresor .....	247
<b>Tabla 58</b> Resultados de la prueba 2 según su naturaleza, con otro compresor .....	248
<b>Tabla 59</b> Resultados de la prueba 2, clasificación según sus características físicas (color) con otro compresor .....	250
<b>Tabla 60</b> Resultados con la secuencia de la prueba 2 y clasificación según sus características físicas (defecto) con otro compresor .....	251
<b>Tabla 61</b> Resultados de la discretización de las probetas según sus características físicas (defecto) con la secuencia de la prueba 3 y con otro compresor .....	252
<b>Tabla 62</b> Resultados al discretizar las probetas según su naturaleza según la secuencia de la prueba 3 y con otro compresor .....	253

<b>Tabla 63</b> Resultados obtenidos al clasificar según las probetas según su color con la secuencia de la prueba 3 y con otro compresor .....	255
<b>Tabla 64</b> Resultados obtenidos del subsistema de dosificación.....	257
<b>Tabla 65</b> Valores esperados del subsistema de dosificación .....	257
<b>Tabla 66</b> Resultados obtenidos del subsistema de clasificación .....	258
<b>Tabla 67</b> Valores esperados del subsistema de clasificación.....	258

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Banda transportadora para el transporte de masa de pan .....	30
<b>Figura 2</b> Banda transportadora diseñada para el transporte de llantas.....	31
<b>Figura 3</b> Banda transportadora implementada en la pesquera Bahía Caldera S.A. ....	32
<b>Figura 4</b> Banda transportadora con brazo clasificador.....	33
<b>Figura 5</b> Línea de clasificación implementada .....	34
<b>Figura 6</b> Configuración general de una línea de producción .....	40
<b>Figura 7</b> Base de deslizamiento con rodillos.....	43
<b>Figura 8</b> Base de deslizamiento con chapa .....	44
<b>Figura 9</b> Wheel sorter diverter .....	46
<b>Figura 10</b> Pop up/Narrow belt .....	46
<b>Figura 11</b> Shoe sorter.....	47
<b>Figura 12</b> Cross belt .....	47
<b>Figura 13</b> Tilt tray .....	48
<b>Figura 14</b> Vertical sorter .....	48
<b>Figura 15</b> Pasos de un sistema de visión artificial .....	50
<b>Figura 16</b> Arquitectura de un PLC .....	53
<b>Figura 17</b> Capas del modelo OSI .....	55
<b>Figura 18</b> Relación entre las capas del modelo OSI y modelo TCP/IP .....	56
<b>Figura 19</b> Pila de OPCUA en el modelo OSI.....	57
<b>Figura 20</b> Iniciativa Fiel Level Communication (FLC) de OPCUA .....	58
<b>Figura 21</b> Modelo en V del proyecto .....	66
<b>Figura 22</b> Representación del problema como una caja negra .....	67

<b>Figura 23</b> Diagrama funcional.....	67
<b>Figura 24</b> Bosquejo conceptual.....	68
<b>Figura 25</b> Esquema del funcionamiento de la banda transportadora.....	70
<b>Figura 26</b> Tipo de material para cinta.....	74
<b>Figura 27</b> Carga parcial de motores (como función del % de eficiencia a plena carga) .....	80
<b>Figura 28</b> Diagrama de cuerpo libre de un elemento infinitesimal en una cinta en contacto con un rodillo .....	87
<b>Figura 29</b> Fuerzas y pares de torsión sobre un rodillo.....	88
<b>Figura 30</b> Estructura del subsistema de transporte.....	92
<b>Figura 31</b> a) Vista isométrica del soporte para el motorreductor, b) Vista lateral del soporte para el motorreductor .....	94
<b>Figura 32</b> Chumacera UCFL 204.....	95
<b>Figura 33</b> Chumacera tensora UFC 204-12 .....	96
<b>Figura 34</b> Mecanismo de tensado.....	96
<b>Figura 35</b> CAD del subsistema de transporte .....	97
<b>Figura 36</b> Cargas estáticas en el eje motriz.....	98
<b>Figura 37</b> Cargas para el método de la doble integración.....	100
<b>Figura 38</b> Diagrama de esfuerzo cortante del eje motriz .....	103
<b>Figura 39</b> Diagrama de momento flector .....	104
<b>Figura 40</b> Bosquejo de la opción A.....	114
<b>Figura 41</b> Bosquejo de la opción B.....	115
<b>Figura 42</b> DCL del subsistema dosificador .....	117
<b>Figura 43</b> Diseño final del subsistema dosificador .....	121
<b>Figura 44</b> Análisis estático de la base 1 .....	122

<b>Figura 45</b> Análisis de desplazamiento estático de la base 1.....	123
<b>Figura 46</b> Desplazamiento estático de la base 1.....	124
<b>Figura 47</b> Diagrama de flujo del subsistema dosificador.....	125
<b>Figura 48</b> Diagrama de potencia del subsistema dosificador.....	126
<b>Figura 49</b> Diagrama de control del subsistema dosificador.....	127
<b>Figura 50</b> Tipos de elevación con ventosas.....	129
<b>Figura 51</b> Perfil tipo V 20x20.....	133
<b>Figura 52</b> Estructura del subsistema de clasificación.....	134
<b>Figura 53</b> Mecanismo de transmisión de movimiento seleccionado.....	135
<b>Figura 54</b> Cilindro montado en el carro.....	136
<b>Figura 55</b> Perfil de velocidad trapezoidal.....	138
<b>Figura 56</b> Análisis estático del bastidor del subsistema de clasificación.....	143
<b>Figura 57</b> Análisis del desplazamiento del bastidor del subsistema de clasificación.....	144
<b>Figura 58</b> Diagrama de flujo del subsistema clasificador.....	146
<b>Figura 59</b> Diagrama de potencia del subsistema clasificador.....	147
<b>Figura 60</b> Diagrama de control del subsistema clasificador.....	148
<b>Figura 61</b> Soporte tipo T.....	151
<b>Figura 62</b> Acople para la cámara.....	152
<b>Figura 63</b> Subsistema de reconocimiento a implementarse.....	153
<b>Figura 64</b> Análisis estático del soporte tipo T del subsistema de reconocimiento.....	154
<b>Figura 65</b> Análisis de desplazamiento del soporte tipo T del subsistema de reconocimiento.....	155
<b>Figura 66</b> Desplazamiento estático del soporte tipo T del subsistema de reconocimiento.....	156
<b>Figura 67</b> Diagrama de funcionamiento del subsistema de reconocimiento.....	157
<b>Figura 68</b> Módulo didáctico de un clasificador industrial a implementarse.....	159

<b>Figura 69</b> Análisis de Von Mises del bastidor de la banda transportadora .....	160
<b>Figura 70</b> Análisis de desplazamiento del bastidor de la banda transportadora .....	161
<b>Figura 71</b> Curva de desplazamiento en la línea neutra del perfil U que soporta mayor número de cargas .....	162
<b>Figura 72</b> Construcción de la banda transportadora .....	166
<b>Figura 73</b> Montaje y fabricación de la banda transportadora .....	166
<b>Figura 74</b> Composición de los rodillos .....	167
<b>Figura 75</b> Bastidor de la banda transportadora pintado .....	167
<b>Figura 76</b> Banda transportadora construida.....	168
<b>Figura 77</b> Sensor capacitivo .....	169
<b>Figura 78</b> Sensor inductivo .....	169
<b>Figura 79</b> Fin de carrera .....	169
<b>Figura 80</b> Sensor de presión .....	170
<b>Figura</b> Sensor magnético .....	170
<b>Figura 82</b> Dado del subsistema de dosificación .....	171
<b>Figura 83</b> Soporte del subsistema de dosificación .....	171
<b>Figura 84</b> Rampa del subsistema de dosificación .....	172
<b>Figura 85</b> Soporte para el sensor capacitivo del subsistema de dosificación.....	172
<b>Figura 86</b> Subsistema de dosificación implementado .....	173
<b>Figura 87</b> Soporte para el sensor capacitivo.....	174
<b>Figura 88</b> Soporte para los fines de carrera.....	174
<b>Figura 89</b> Soporte del sensor de presión montado en el cilindro neumático .....	175
<b>Figura 90</b> Soporte para el motor paso a paso.....	176
<b>Figura 91</b> Motor paso a paso NEMA 23 ensamblado en el perfil V .....	176

<b>Figura 92</b> Soporte para la polea.....	177
<b>Figura 93</b> Cilindro con sus soportes tipo pie acoplado al carro.....	178
<b>Figura 94</b> Subsistema de clasificación implementado.....	179
<b>Figura 95</b> Subsistema de reconocimiento implementado.....	180
<b>Figura 96</b> PLC Modicon M241.....	186
<b>Figura 97</b> Procesos de mecanizado en el tablero.....	190
<b>Figura 98</b> Disposición de los tableros en el bastidor de la banda transportadora.....	190
<b>Figura</b> Tablero de potencia y control implementado.....	191
<b>Figura 100</b> Tablero de potencia y control implementado. a) Vista interna del tablero. b) Vista externa del tablero.....	192
<b>Figura 101</b> Modelo CAD de la caja de electroválvulas.....	193
<b>Figura 102</b> Caja de electroválvulas acoplada al perfil L de A36.....	194
<b>Figura 103</b> Caja de electroválvulas y unidad de mantenimiento acopladas al bastidor de la banda transportadora.....	194
<b>Figura 104</b> Compresor empleado para la implementación neumática.....	195
<b>Figura 105</b> Manómetros del compresor.....	196
<b>Figura 106</b> Esquema de las conexiones neumáticas y eléctricas de las electroválvulas.....	196
<b>Figura 107</b> Driver YS-DIV268N-5A.....	198
<b>Figura 108</b> Tablero de control de motores. a) vista exterior del tablero, b) vista interior del tablero.....	199
<b>Figura 109</b> Página 1 del diagrama de flujo del funcionamiento general.....	200
<b>Figura 110</b> Página 2 del diagrama de flujo del funcionamiento general.....	201
<b>Figura 111</b> Página 3 del diagrama de flujo del funcionamiento general.....	202
<b>Figura 112</b> Página 4 del diagrama de flujo del funcionamiento general.....	203
<b>Figura 113</b> Primeras instrucciones de la programación Ladder en el SR_Main.....	204

<b>Figura 114</b> Configuración del PTO para controlar el motor paso a paso.....	205
<b>Figura 115</b> Bloques de POWER y STOP .....	205
<b>Figura 116</b> Bloque de movimiento en la dirección positiva o CW(Clockwise).....	206
<b>Figura 117</b> Activación y desactivación automática del bloque STOP usando un temporizador .....	207
<b>Figura 118</b> Temporizador para detener el carro justo en la mitad del clasificador .....	207
<b>Figura 119</b> Árbol de aplicaciones del PLC .....	208
<b>Figura 120</b> Variables que se conectaron al OPCUA y su modo de acceso lectura/escritura .....	208
<b>Figura 121</b> Configuración de seguridad del servidor OPCUA .....	209
<b>Figura 122</b> Diagrama de flujo del subsistema de reconocimiento .....	210
<b>Figura 123</b> Directorio raíz del servidor OPCUA.....	212
<b>Figura 124</b> Acceso de datos del servidor OPCUA.....	212
<b>Figura 125</b> Contadores para la programación basada en eventos .....	214
<b>Figura 126</b> Diagrama de flujo de la función main.....	216
<b>Figura 127</b> Pasos para clasificar las probetas por colores .....	217
<b>Figura 128</b> Imagen obtenida de la video captura .....	218
<b>Figura 129</b> Imagen transformada a la escala de grises.....	219
<b>Figura 130</b> Imagen obtenida en HSV .....	219
<b>Figura 131</b> Escala de grises difuminada utilizando GaussianBlur .....	220
<b>Figura 132</b> Resultado de la aplicación de la transformada de Hough .....	221
<b>Figura 133</b> Conceptualización del Modelo HSV .....	222
<b>Figura 134</b> Color en HSV con sliders para sus canales.....	222
<b>Figura 135</b> Detección del color azul en la probeta .....	223
<b>Figura 136</b> Detección del color violeta en la probeta.....	224
<b>Figura 137</b> Pasos para clasificar las probetas por defectos .....	225

<b>Figura 138</b> Bordes detectados utilizando el método Canny.....	226
<b>Figura 139</b> Contorno de una probeta normal.....	227
<b>Figura 140</b> Contorno de probeta defectuosa #1 .....	227
<b>Figura 141</b> Contorno de la probeta defectuosa #2.....	227
<b>Figura 142</b> Programación en el PLC y programa en Python ejecutándose.....	231
<b>Figura 143</b> Probetas marcadas para las pruebas.....	233
<b>Figura 144</b> Características del compresor empleado para las pruebas.....	247
<b>Figura 145</b> Segunda probeta con defectos .....	252

## Resumen

En el documento se desarrolla el proyecto de titulación llamado “Diseño e implementación de un módulo didáctico de un clasificador industrial para la discretización de probetas por medio de sensores digitales y visión artificial”. El proyecto consistió en diseñar e implementar una plataforma orientada al estudio de la automatización industrial. Es decir, se creó una herramienta de apoyo para que los estudiantes de ingeniería mecatrónica logren consolidar el conocimiento teórico adquirido durante la carrera de una forma práctica. La fase de diseño se orientó a que el módulo tuviera las siguientes características: contar con una banda transportadora impulsada por un motor trifásico, incorporar componentes industriales como un variador de frecuencia y un PLC, y finalmente llevar a cabo un proceso de clasificación según el tipo de material y características visibles. El proyecto se compone de cuatro subsistemas detallados a continuación: el subsistema de transporte que se encarga de transportar las probetas. El subsistema de dosificación encargado de entregar las probetas utilizando un actuador neumático. El subsistema de reconocimiento responsable de identificar las características y naturaleza de las probetas. También se utilizó una cámara y se programó un algoritmo de visión artificial para reconocer las características visibles de las probetas, como color y defectos. El subsistema de clasificación se encarga de depositar las probetas en recipientes; se compone de un actuador neumático con una ventosa que utiliza una presión de vacío generada por un tubo Venturi para levantar las probetas. Además, un motor paso a paso mueve el cilindro con la ventosa gracias a un mecanismo de poleas, depositando la probeta en su respectivo recipiente. También se construyeron dos tableros eléctricos para alojar los circuitos de potencia y de control. Finalmente, se programó un PLC para ejecutar el proceso de clasificación y se lo configuró como servidor OPCUA para establecer conexión con el cliente o computadora personal que ejecuta el algoritmo de visión artificial en Python.

*Palabras clave:* automatización industrial, banda transportadora, neumático, visión artificial, clasificación.

### **Abstract**

The document outlines the graduation project titled "Design and Implementation of an Educational Module for an Industrial Classifier for Specimen Discretization using Digital Sensors and Computer Vision." The project involved designing and implementing a platform oriented towards the study of industrial automation. In essence, it created a supporting tool for mechatronics engineering students to solidify the theoretical knowledge acquired during their academic journey through practical application. The design phase was geared towards imbuing the module with the following attributes: featuring a conveyor belt driven by a three-phase motor, integrating industrial components like a frequency converter and a PLC, and ultimately executing a classification process based on material type and visible characteristics.

The project is comprised of four subsystems detailed below: the transport subsystem utilizes a gear motor with a frequency converter to transport the specimens. The dosing subsystem is responsible for dispensing the specimens through a pneumatic actuator. The recognition subsystem employs a capacitive sensor and an inductive sensor for material-based specimen classification. Additionally, a camera was used, and a computer vision algorithm was programmed to recognize visible specimen characteristics such as color and defects. The classification subsystem deposits the specimens into containers; it features a pneumatic actuator equipped with a vacuum-based suction cup using a Venturi tube to lift the specimens. Additionally, a stepper motor moves the suction cup-equipped cylinder through a pulley mechanism, placing the specimen into its designated container.

Furthermore, two electrical panels were constructed to house power and control circuits. Lastly, a PLC was programmed to execute the classification process and was configured as an OPC UA server to establish connection with the client or personal computer running the Python-based computer vision algorithm.

*Keywords:* industrial automation, conveyor belt, pneumatic, computer vision, sorting.

## Capítulo I

### Generalidades

En el capítulo se describe la introducción, planteamiento del problema, justificación e importancia, objetivos, alcance y la estructura del documento para dar un enfoque general de lo que trata el proyecto.

#### Introducción

El proyecto trata sobre el diseño e implementación de un módulo didáctico para clasificar probetas de A36 y ABS, según sus características físicas y naturaleza utilizando sensores digitales y visión artificial.

El objetivo es proporcionar una herramienta de apoyo para la instrucción de los estudiantes del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la universidad, así como crear un entorno simulado de una línea de producción industrial donde los estudiantes puedan interactuar con elementos, mecanismos y sistemas relevantes. El módulo permitirá fortalecer el conocimiento teórico previamente adquirido y el desarrollo de habilidades y destrezas de los estudiantes en los campos de estudio que intervienen en el proyecto.

Para el desarrollo adecuado del proyecto, se identificaron las necesidades y requerimientos mediante la aplicación de la metodología de diseño concurrente QFD y la norma VDI 2206. Como resultado, se obtuvieron 9 necesidades que se detallarán en el capítulo III, al igual que el diseño de cada subsistema basado en los fundamentos teóricos expuestos en el capítulo II. Luego, en el capítulo IV, se realizará la implementación para que en el capítulo V, se sometan a pruebas y se evalúen los resultados para que finalmente, en el capítulo VI, se presenten las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Además, el módulo didáctico está compuesto por cuatro subsistemas que se encargan de la dispensación, transporte, reconocimiento y clasificación de las probetas. Un PLC controla el módulo y

por medio de un panel de control permite a los estudiantes y docentes seleccionar el tipo de clasificación y visualizar el estado del módulo didáctico. A su vez, se utilizan tecnologías como visión artificial para reconocer las características físicas de las probetas, como color y defectos, así como sistemas neumáticos para la dosificación y clasificación.

Con estos enfoques y tecnologías, el proyecto proporcionará una herramienta valiosa para la educación y el desarrollo de habilidades prácticas de los estudiantes en el campo de la energía, mecánica y automatización industrial.

### **Antecedentes**

La automatización de los procesos de producción se basa en la integración de tecnologías de varios campos de estudio, como la mecánica, la electrónica y la informática. Podría describirse la automatización como el proceso de detectar cambios de estados físicos mediante sensores o cámaras y enviar señales eléctricas de entrada a un controlador que responde según una lógica de programación, generando señales eléctricas de salida para activar los actuadores y ejecutar el proceso. Además, se puede gestionar la información obtenida en el proceso mediante redes de comunicación integradas por los controladores y servidores.

Las posibilidades de cómo llevar a cabo un proceso automatizado son diversas, lo que da lugar a numerosos proyectos e investigaciones relacionadas con este tema en instituciones de educación superior. Por lo que se revisaron tanto trabajos internacionales como nacionales que guardan relación con los objetivos, descripción y alcance planteados para el desarrollo del proyecto.

### ***Trabajos internacionales***

Se detallan características de trabajos de titulación internacionales realizados en diferentes universidades. Uno de ellos es el trabajo titulado "Diseño y construcción de una cinta transportadora para el transporte de masa de pan," llevado a cabo en la Universidad de Valencia en el año 2019. Otro proyecto es el titulado "Diseño de una banda transportadora de llantas para la empresa Bridgestone de

Colombia mediante la metodología de diseño QFD," elaborado por la Universidad Distrital "Francisco José de Caldas" en el año 2015. Por último, se menciona el trabajo titulado "Diseño Cinta Transportadora Intralox para Pesquera Bahía Caldera S.A.," desarrollado por la facultad de ingeniería de la Universidad del Bio-Bio de Chile en el año 2013.

***Diseño y construcción de una cinta transportadora para el transporte de masa de pan.*** El proyecto se centró en diseñar un transportador capaz de transferir la masa de pan a otro transportador sin generar fallas en la máquina ni desperdiciar el producto. Se puso énfasis en el diseño de un cabezal que cumpliera con las necesidades establecidas y que minimizara su desgaste. Debido al corto plazo de entrega, se requirió una gran cantidad de manufactura, lo que resultó en costos de fabricación elevados. No obstante, la banda transportadora construida (ver figura 1) demostró un óptimo desempeño.

#### **Figura 1**

*Banda transportadora para el transporte de masa de pan*



*Nota.* Imagen obtenida de: (Pastor Peidro, 2019).

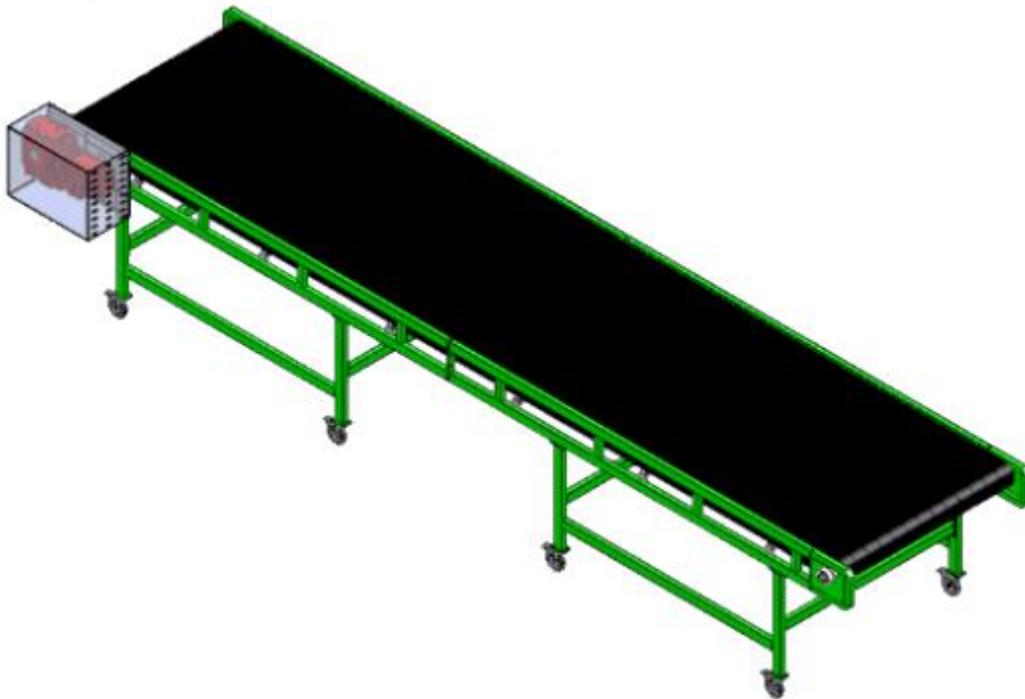
**Diseño de una banda transportadora de llantas para la empresa BRIDGESTONE de Colombia mediante metodología de diseño QFD.** Se plantea el diseño de una banda transportadora capaz de mover llantas descargadas de un contenedor a la bodega destinada para su almacenaje (ver figura 2). Para el diseño, se tuvieron en cuenta factores importantes como las cargas, geometría y materiales.

Además, se realizó un análisis por elementos finitos para disminuir el peso de la banda, asegurándose de mantener las restricciones del factor de seguridad entre 1.2 y 1.8.

Asimismo, se implementó un sensor fotoeléctrico de barrera para llevar el conteo preciso de las llantas durante su transporte.

## Figura 2

*Banda transportadora diseñada para el transporte de llantas*



*Nota.* Imagen obtenida de: (Sierra & Torres, 2015)

**Diseño Cinta Transportadora Intralox para Pesquera Bahía Caldera S.A.** Se plantea el diseño de una banda transportadora para la empresa pesquera Bahía Caldera S.A., enfocada en la producción de harina y aceite de pescado, con un régimen de trabajo estimado de 12 horas al día (ver figura 3). Para garantizar la seguridad y eficiencia del diseño, se considera la nula exposición a altas velocidades y cargas laterales, por lo que se opta por un recorrido recto como sistema de la banda. Además, se toma

en cuenta la deflexión máxima de 0.1 pulgadas, valor común en transportadores unidireccionales, para definir el número de cojinetes necesarios.

### **Figura 3**

*Banda transportadora implementada en la pesquera Bahía Caldera S.A.*



*Nota.* Imagen obtenida de: ( Muñoz Oporto & Lagos Correa, 2013)

### ***Trabajos nacionales***

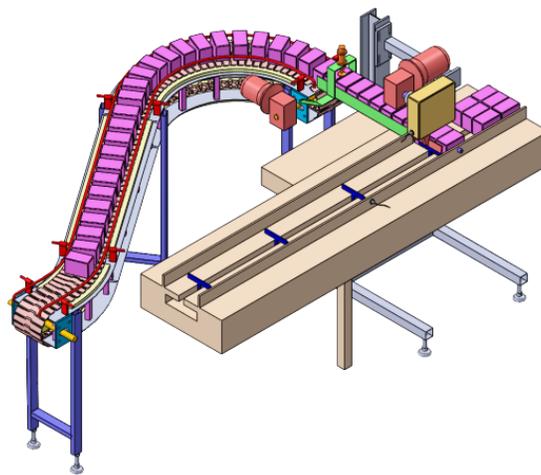
Se describen las investigaciones y trabajos de titulación nacionales realizados en la universidad. Uno de ellos es el proyecto titulado "Diseño y construcción de una banda transportadora con brazo clasificador para la automatización del empaquetado de toallas sanitarias, para la empresa de construcción de maquinaria J.W. - CEMAIN," realizado en el año 2017. El segundo proyecto de titulación es "Diseño e implementación de una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico Melfa RV-2SBD, mediante el uso de visión artificial para generación de trayectorias reconfigurables y la incorporación de un sistema de seguridad activa," desarrollado en el año 2018.

**Diseño y construcción de una banda transportadora, con brazo clasificador, para la automatización del empaquetado de toallas sanitarias, para la empresa construcción de maquinaria**

**J.W. - CEMAIN.** Se realizó el diseño y construcción de una banda modular semicircular de 6 m de longitud (ver figura 4), para transportar y clasificar toallas higiénicas de la marca Nosotras Básica con alas y Nosotras Invisible Clásica. La banda tiene una capacidad de transportar 75 paquetes por minuto. Por otra parte, en el proceso de diseño, se implementó un mecanismo de Hoecken para la recepción y agrupación del producto en sixpacks, asegurando una manipulación eficiente y precisa.

**Figura 4**

*Banda transportadora con brazo clasificador*



*Nota.* Imagen obtenida de: (Fuentes Ocejó, 2017)

**Diseño e implementación de una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico Melfa RV-2SBD, mediante el uso de visión artificial para generación de trayectorias reconfigurables y la incorporación de un sistema de seguridad activa.** El trabajo de titulación presenta el diseño e implementación de una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico (ver figura 5). Este manipulador robótico tiene la capacidad de reconocer y activarse al detectar un objeto, lo que permite que el efector final pueda colocar y ubicar el objeto en uno de los contenedores según su forma o color. En la implementación del sistema de visión artificial, se establece la comunicación entre ID Qt (OpenCV) y Matlab. Utilizando las coordenadas de posición del brazo robótico, se realiza la codificación necesaria para que Matlab pueda mantener el control de los movimientos del robot Melfa. Además, el sistema

incorpora medidas de seguridad activa para asegurar un entorno seguro para la colaboración entre el robot y el operador, evitando accidentes por golpes directos del manipulador.

### **Figura 5**

*Línea de clasificación implementada*



*Nota.* Imagen obtenida de: (Mogro Borja, 2018)

### **Análisis comparativo**

Los proyectos mencionados presentan características generales que permiten identificar similitudes y diferencias. Se destaca la consideración de limitaciones en el diseño de la banda transportadora, su relación con el espacio disponible para la implementación y el tipo de producto a transportar. Asimismo, se observa la versatilidad que ofrece la implementación de sistemas de visión artificial para el reconocimiento y procesos de clasificación. Además, se evidencia la influencia significativa del uso de bandas transportadoras en el sector industrial, lo cual subraya la importancia de conocer su funcionamiento y la aplicación de conocimientos de automatización y control en este ámbito.

### **Planteamiento del problema**

Los equipos que emulan procesos industriales automatizados (módulos didácticos) que cuenten con tecnología actualizada para la enseñanza en los laboratorios de las universidades son distribuidos por empresas extranjeras por lo cual son bastante costosos y difíciles de conseguir; Entonces una opción

más realista es que los estudiantes sean quienes diseñen e implementen estos equipos sin embargo se deben tener ciertas consideraciones que son obstáculos iniciales en la fase de diseño.

En lo que respecta a los obstáculos para implementar algún módulo didáctico se han identificado los siguientes: en primer lugar, se tiene la dificultad para seleccionar los sensores y actuadores, ambos elementos son indispensables para obtener información del entorno y para transmitir energía/momento respectivamente. En segundo lugar, la falta de control, adquisición y envío de datos, impiden que se pueda implementar algún sistema de control automático. En tercer lugar, la carencia de una estructura de bastidor y de mecanismos correctamente diseñados, condicionan la fiabilidad de cualquier equipo haciéndolo poco robusto y susceptible a fallas.

En efecto la implementación de un módulo didáctico debería servir como una plataforma de aprendizaje sobre sistemas mecatrónicos, pero en base a los impedimentos expuestos anteriormente se limita la capacidad de construir este tipo de equipos. En tal sentido, si los ingenieros en formación no tienen instrucción alguna con este tipo de máquinas, posteriormente van a egresar con deficiencias de aprendizaje en las áreas de mecánica, electrónica y control.

### **Justificación e importancia**

Los procesos industriales automatizados suelen estar compuestos por un conjunto de estaciones de trabajo donde cada una de ellas tiene una función específica, entre las cuales están el despacho y recepción de materiales, la clasificación, maquinado, empaquetado entre otras. En efecto el que estén automatizadas brindan ventajas competitivas como el aseguramiento de la calidad, tener una mayor producción en menos tiempo y el aprovechamiento de los datos utilizados para realizar tareas más complejas como autodiagnósticos o informes estadísticos. A partir de esto se infiere que las universidades deben tener la capacidad de formar a sus profesionales, de manera que no solo se limiten a entender la teoría, sino que mediante el uso de módulos didácticos consoliden el conocimiento

previamente adquirido, para de esta manera sepan cómo aprovechar al máximo las bondades brindadas por una estación de trabajo automatizada.

Igualmente, las estaciones de trabajo automatizadas se componen por automatismos y sistemas de control, los cuales requieren un diseño a detalle para que sean funcionales, simples y usen eficientemente la energía. A partir de esto se propone que el diseño concurrente es una metodología adecuada para este fin, dado que actualmente se dispone de una variedad softwares para el diseño como CAD, CAM, CAE, software de simulación para circuitos eléctricos y el control de los PLCs (controladores lógicos programables). Es por esta razón que, teniendo una adecuada fase de diseño, se pueden minimizar los esfuerzos redundantes y desarrollar una máquina de mayor cantidad con los recursos disponibles.

En conclusión, el proyecto con en el diseño e implementación de un módulo didáctico de un clasificador industrial, compuesto por una banda transportadora y un subsistema de clasificación automatizado, para discriminar probetas según su naturaleza y características físicas. La novedad de este proyecto es que se realizó utilizando la filosofía del diseño concurrente para obtener una plataforma de calidad y que esté constituida en la mayor medida posible de elementos de uso industrial. Con el fin de emular un proceso industrial y contribuir en el aprendizaje en el área de automatización y tener una plataforma en la cual integrar tecnología innovadora como el IoT e IA en el futuro.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Diseñar e implementar un módulo didáctico de un clasificador industrial para la discretización de probetas por medio de sensores digitales y visión artificial.

### ***Objetivos específicos***

- Construir una banda transportadora capaz de mover probetas de geometría y material específicos.

- Diseñar e incorporar un dispensador para colocar las probetas sobre la banda transportadora de forma automática.
- Implementar un subsistema de reconocimiento y control mediante el uso de sensores y visión artificial para obtener datos de las probetas.
- Diseñar y equipar un subsistema clasificador para discretizar las probetas por metal o no metal y por sus características físicas visibles (colores y defectos).
- Realizar ensayos para evaluar el funcionamiento del clasificador industrial.

### **Alcance**

El módulo didáctico del clasificador industrial permitirá la clasificación de hasta 6 probetas cilíndricas de A36 y ABS. A través de sensores digitales y el empleo de visión artificial, se logrará diferenciarlas según su naturaleza, es decir, si son metálicas o no metálicas, y sus características físicas, como su color y la presencia de defectos, como secciones faltantes.

En cuanto a su diseño, se busca que la máquina sea fácilmente ensamblable y desmontable, además de contar con un manejo sencillo. Asimismo, deberá incluir un manual y respaldos que faciliten la manipulación y realización de cambios.

Por otro lado, es necesario que el módulo incluya componentes industriales para proporcionar una experiencia cercana a la industria. A su vez, se procurará incorporar diversas tecnologías para integrar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

### **Estructura del documento**

El documento consta de seis capítulos:

El primer capítulo aborda la introducción, los antecedentes, los objetivos, la justificación y el alcance del proyecto.

En el segundo capítulo se encuentran los fundamentos teóricos, donde se detallan las definiciones necesarias que influyeron en la composición y diseño del proyecto.

El tercer capítulo abarca la planificación del proyecto, definiendo los subsistemas que componen la máquina y sus respectivos diseños.

En el cuarto capítulo se describe en detalle la implementación de los subsistemas de transporte, dosificación, reconocimiento y clasificación, el diseño y construcción de los tableros de potencia y control y también la programación del PLC y del Script de Python.

El quinto capítulo presenta las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos para determinar el cumplimiento de los objetivos establecidos.

Finalmente, el sexto capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del proyecto desarrollado.

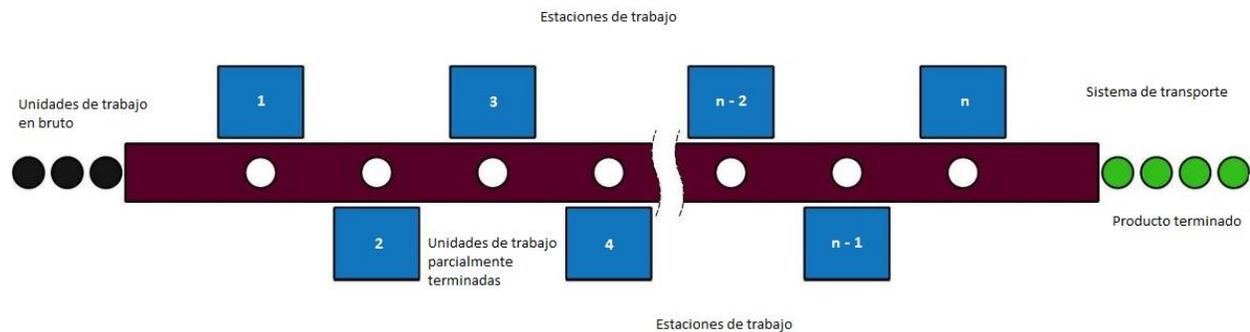
## Capítulo II

### Fundamentos teóricos

En el capítulo, se presenta una breve investigación acerca de las líneas de producción industrial. A su vez, se hace énfasis en la banda transportadora detallando su definición, ventajas, desventajas, partes y tipos. Además, se incluye una breve descripción de los sistemas de dosificación industrial y los sistemas de clasificación industrial. Finalmente, se mencionan las aplicaciones de visión artificial en la industria para el proceso de clasificación y el protocolo de comunicación OPC UA.

#### Líneas de producción industrial

Una línea de producción es el conjunto de estaciones de trabajo donde la transferencia del producto a lo largo de la línea se realiza mediante un dispositivo de transferencia mecánica o sistema de transporte. Gracias a los avances tecnológicos se emplean sistemas integrados que operan bajo el control de una computadora y se les denomina líneas de producción automatizadas donde la intervención del ser humano se limita a funciones auxiliares como cambiar herramientas, cargar y descargar partes, reparación y mantenimiento. Esta integración de hardware y un software hacen de ella una unidad eficiente y confiable. El hardware incluye estaciones de trabajo y sistemas de manejo de materiales para la manufactura automatizada como los transportadores de rodillos y las bandas transportadoras (ver figura 6) (SeamPedia, 2018).

**Figura 6***Configuración general de una línea de producción*

*Nota.* El gráfico representa la constitución general de una línea de producción industrial. Imagen obtenida de: (Groover, 1997).

**Banda transportadora**

La banda transportadora es uno de los componentes más difundidos que se remonta al año 1795 en la industria minera. Su función principal es la de trasladar materiales de un lugar a otro gracias a una polea motriz que generalmente se apoya sobre un soporte metálico. Dependiendo del proceso tecnológico y del tipo de carga a transportarse sus dimensiones y composición pueden variar (Miravete de Marco, Larrodé, Castejón, & Cuartero, 2002).

Por otra parte, la velocidad de la banda transportadora puede ajustarse para adaptarse a la velocidad requerida del proceso y garantizar una manipulación cuidadosa de los materiales. También se pueden utilizar múltiples bandas transportadoras en serie para crear sistemas de transporte más complejos y extensos (LTA, 2022).

**Ventajas**

- Aceleración y sistematización de la producción
- Degradación mínima del material transportado
- Posibilidad de desplazar la carga a grandes velocidades
- Escasa o nula necesidad de personal

- Mejoramiento de la salud del personal

### ***Desventajas***

- Poca adaptación a modificaciones
- Rápido desgaste por transportar materiales calientes, abrasivos y de gran tamaño

### ***Aplicaciones***

Algunas de las aplicaciones más comunes de las bandas transportadora incluyen:

- **Industria minera:** para transportar minerales y materiales a granel desde la mina hasta los puntos de procesamiento o carga.
- **Industria manufacturera:** para el movimiento de componentes y productos a lo largo de las líneas de ensamblaje y producción.
- **Logística y distribución:** En almacenes y centros de distribución para el manejo y transporte de paquetes, cajas y productos envasados.

En resumen, las bandas transportadoras son una solución versátil y eficiente para el transporte de materiales en la industria, facilitando la automatización y mejorando la productividad de los procesos industriales.

### ***Partes***

A continuación, se describen las partes más comunes de una banda transportadora:

- **Cinta o banda:** es el componente principal y visible de la banda transportadora. Consiste en una superficie continua y flexible que se desplaza para transportar los objetos o materiales. La banda está hecha de materiales duraderos y resistentes, como goma, PVC, poliéster o acero.
- **Rodillos o tambores:** son cilindros giratorios colocados en los extremos de la banda. Los rodillos proporcionan el soporte y la guía para el movimiento de la

banda. Pueden ser de distintos tamaños y configuraciones según el diseño de la banda transportadora.

- Estructura o chasis: es el marco que sostiene y mantiene la cinta y los rodillos en su lugar. La estructura de la banda transportadora es generalmente metálica y puede tener forma de U, forma de C o forma de I, dependiendo del tipo de aplicación y la longitud de la banda.

- Motor y sistema de accionamiento: es el componente que proporciona la energía necesaria para mover la banda transportadora. Puede ser un motor eléctrico conectado directamente a uno de los rodillos o tambores, o a través de un sistema de poleas y correas para transmitir el movimiento.

- Sistema de tensión: es un mecanismo que permite ajustar la tensión de la banda para mantenerla firme y evitar deslizamientos o desviaciones. El sistema de tensión puede consistir en poleas de tensión o dispositivos tensores ajustables.

- Rodillos de retorno: son rodillos adicionales colocados debajo de la parte inferior de la banda. Ayudan a soportar el peso de la banda y a guiarla en su recorrido de retorno cuando está en movimiento.

- Guías laterales: son elementos colocados a los lados de la banda transportadora para evitar que los materiales se desvíen o caigan fuera de la banda durante el transporte.

- Sensores y dispositivos de control: dependiendo de la aplicación y el nivel de automatización, la banda transportadora puede estar equipada con sensores para detectar objetos, dispositivos de control para regular la velocidad y otros elementos que permitan la automatización y la interacción con otros sistemas en la línea de producción.

*Nota.* Obtenido de: (Miravete de Marco, Larrodé, Castejón, & Cuartero, 2002)

### ***Tipos de banda transportadora***

Por su disposición:

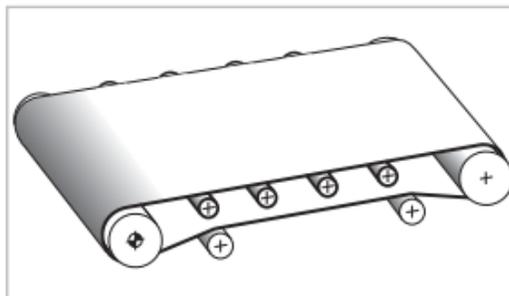
- Horizontal
- Inclínada
- Vertical

Por su base de deslizamiento:

Con rodillos portantes (figura 7): constituido de rodillos móviles para agilizar el manejo y traslado del producto. Para el sector industrial, automotriz, paquetería, almacenaje, etc. Transferencia de contenedores vacíos entre estaciones de trabajo o de contenedores llenos a la zona de “despacho”. En distancias de transporte largas y cargas de producto en general grandes. La cama de rodillos reduce las pérdidas por fricción, la fuerza tangencial y la demanda de potencia de accionamiento se ven reducidas proporcionalmente

### **Figura 7**

*Base de deslizamiento con rodillos*



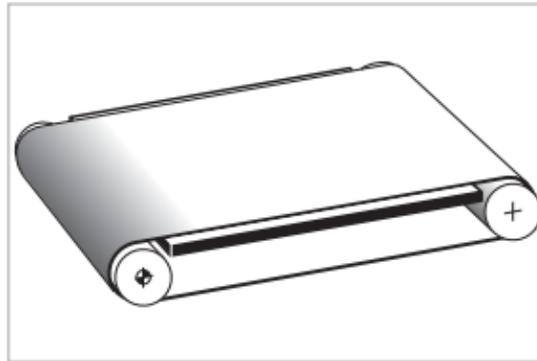
*Nota.* Obtenida de: (Habasit AG, 2019)

Con chapa (ver figura 8): el tipo de material y el acabado superficial de la base de deslizamiento influye en la fricción entre la base de deslizamiento y la cinta, así como también por la humedad, el polvo, la suciedad, etc. El exceso de humedad entre la base de deslizamiento y la cinta aumenta la

adhesión (efecto de succión), provocando una mayor demanda de energía, lo que conduce, potencialmente, a la sobrecarga del accionamiento. Las medidas recomendadas para prevenir el efecto de succión son: perforar la base de deslizamiento, utilizar una cinta con un lado de deslizamiento estructurado (por ejemplo, estructura de cuadrilla).

### **Figura 8**

*Base de deslizamiento con chapa*



*Nota.* Obtenida de: (Habasit AG, 2019)

### **Sistemas de dosificación industrial**

Un dosificador industrial se enfoca en medir y entregar cantidades exactas y controladas permitiendo la optimización de tiempo y recursos, mejorando la seguridad del entorno laboral (Investigación y Aplicaciones A Procesos,S.L., 2019). En la industria su uso es muy frecuente y a pesar de distribuir distintas materias primas el principio es el mismo.

De modo que, para el proyecto es de interés conocer de manera general los diferentes tipos de sistemas de dosificación, los cuales se mencionan a continuación:

- Dosificador volumétrico: su función es la de medir el volumen de un producto y dispensarlo de manera repetitiva. Se puede utilizar pistones, bombas peristálticas o sistemas de cilindros y válvulas para controlar la cantidad exacta que se dispensa en cada ciclo. A su vez, necesitan calibración previa y no son capaces de compensar las variaciones en la

densidad de la materia de forma automática (Investigación y Aplicaciones A Procesos,S.L., 2019).

- Dosificadores gravimétricos: miden el peso del producto y ajustan la cantidad dispensada para lograr un peso objetivo. Es decir, se basan en la pérdida de una cantidad de peso en un espacio de tiempo específico. Son útiles cuando se requiere una alta precisión, especialmente en materiales con densidades variables ya que no utilizan una referencia para calibrar el caudal de dosificación (Investigación y Aplicaciones A Procesos,S.L., 2019).

### **Sistemas de clasificación industrial**

Los sistemas de clasificación industrial son aplicaciones tecnológicas que se utilizan en diferentes industrias para categorizar o separar objetos o materiales en función de sus características específicas como su peso, tamaño o forma. Presentan diversas ventajas tales como mejorar la eficiencia y precisión en el proceso de clasificación, reducir errores humanos y acelerar la producción. Por lo que en consecuencia se evidencia en la maximización de la productividad y la calidad del proceso (Chumillas Technology S.L., 2023). Algunos de los sistemas de clasificación industrial más comunes son los siguientes:

***Diverter (desviador):*** “El sorter diverter traslada el producto sobre un transportador. El desviador (ver figura 9), que es un dispositivo electroneumático, se acciona cuando lo detecta empujándolo hacia la salida indicada” (G.I.Eicom, s.f.).

**Figura 9**

Wheel sorter diverter



*Nota.* Imagen obtenida de: (Ristec, s.f.)

**Pop up/ Narrow Belt:** “La función de los Pop up y Narrow Belt (ver figura 10) es desviar el producto por medio de un mecanismo ubicado en cada salida. El producto es empujado hacia arriba al mismo tiempo que es activado hacia afuera” (G.I.Eicom, s.f.).

**Figura 10**

Pop up/Narrow belt



*Nota.* Imagen obtenida de: (G.I.Eicom, s.f.)

**Shoe sorter:** presenta más ventajas tras su implementación. La forma en la que desvía el producto es guiándolo hacia la salida, por medio de un mecanismo oculto que acciona las vías hacia la

salida requerida. Es bastante gentil respecto al manejo de los productos, pero es más costoso que los demás (G.I.Eicom, s.f.).

### Figura 11

*Shoe sorter*



*Nota.* Imagen obtenida de: (Bastian Solutions, s.f.)

**Cross belt:** “El clasificador Cross belt (también llamado sorter de bandas cruzadas) se usa mucho para la industria de envíos y en general cuando se requiere una gran cantidad de salidas por su gran productividad en la clasificación de productos” (G.I.Eicom, s.f.).

### Figura 12

*Cross belt*



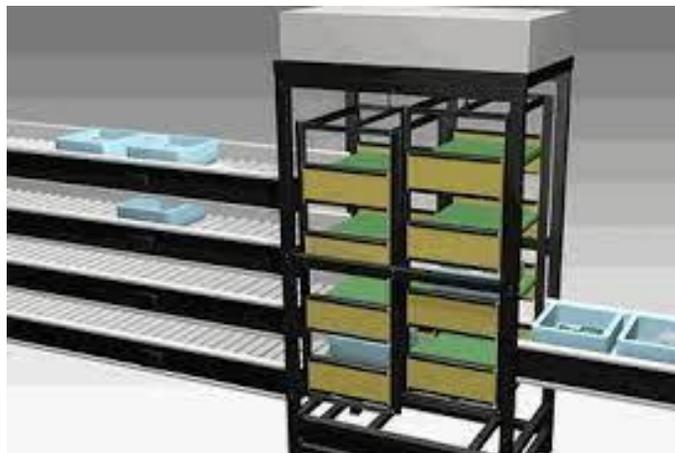
*Nota.* Imagen obtenida de: (G.I.Eicom, s.f.)

**Tilt tray:** funciona mediante charolas que al llegar a la correcta posición se inclinan y dejan caer el producto. Al igual que el Cross Belt es para operaciones demandantes, pero deben analizarse conforme la operación, tipo de producto o industria (G.I.Eicom, s.f.).

**Figura 13***Tilt tray*

*Nota.* Imagen obtenida de: (SCALETRONIC, s.f.)

**Sorter vertical:** “El Sorter vertical ayuda a desviar los productos a salidas en diferente plano (superior, medio, bajo). Usualmente, tienen máximo tres salidas y pueden manejar flujos de cajas pesadas” (G.I.Eicom, s.f.).

**Figura 14***Vertical sorter*

*Nota.* Imagen obtenida de: (ITOHDENKI, s.f.)

## **Visión artificial para clasificación en la industria**

Los sistemas de visión artificial funcionan mediante el uso de cámaras y software especializado en la interpretación de imágenes adquiridas, su objetivo es reconocer objetos en el ambiente y su posición en el espacio (Sucar & Gómez), un aspecto a destacar del uso de visión artificial es que se puede igualar o incluso superar la capacidad visual humana para tareas muy específicas.

Al ser una tecnología análoga al sentido de la vista humana está bien encaminada a transformarse en un aspecto fundamental de la automatización industrial ya que con ella se puede “lograr una inspección del 100% para cualquier parte manufacturada durante la producción”. (Shell & Hall, 2000)

### ***Componentes de un sistema de clasificación por visión artificial***

Los sistemas de visión artificial se componen de un conjunto de herramientas de hardware y software, como se indica a continuación:

- Fuente de luz: La iluminación puede ser ambiental la cual depende de la hora del día y de las condiciones meteorológicas, artificial como la puntual generada por láser, la de línea que se produce por lentes cilíndricos y la de área generada por leds. La ventaja de usar fuentes de luz artificiales por sobre la ambiental es que sirven para mejorar las condiciones de la misma, sustituirla, crear contraste entre los objetos de interés y el fondo (Shell & Hall, 2000).
- Dispositivos de captura: Es el dispositivo físico que van a captar las frecuencias del espectro electromagnético reflejadas por los objetos incididos por una fuente de luz. Hay que tener varias consideraciones al momento de seleccionar el tipo de cámara que se va a utilizar como el formato de escaneo, precisión geométrica, estabilidad, ancho de banda, respuesta espectral, ruido en la señal, ratio de ganancia automática, estabilidad offset y la respuesta en el tiempo. Sin embargo, muchas de las aplicaciones no industriales se pueden

realizar con una cámara estándar puesto que si satisfacen mínimamente las consideraciones anteriormente mencionadas (Shell & Hall, 2000).

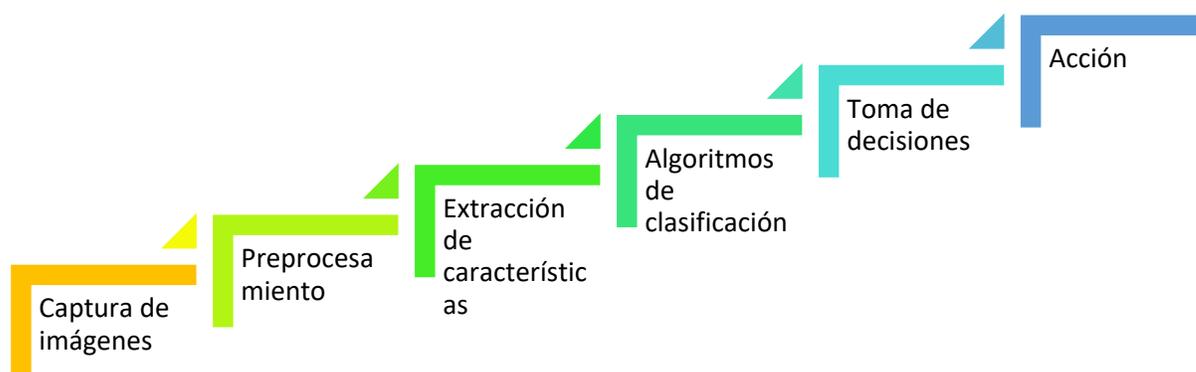
- **Memoria de video:** Es la memoria semiconductor (RAM) que almacena las imágenes digitalizadas como formatos bitmap, cuyos valores numéricos representan los píxeles, cada píxel se representa por 8 bits o 1 byte por lo tanto se tiene que puede tener  $2^8 = 256$  valores que van del 0 al 255, las imágenes pueden estar compuestas por 1 hasta 3 de estos canales que se deben trabajar como matrices (Shell & Hall, 2000).
- **Procesador de visión:** Es el procesador de la computadora en la cual está acoplada la memoria de video y sirve para realizar operaciones matemáticas en las imágenes (Sucar & Gómez).

### ***Funcionamiento de un sistema de clasificación por visión artificial***

En la figura 15 se presentan los pasos que suelen seguir los sistemas de visión artificial, a continuación, se describe cada uno de ellos.

#### **Figura 15**

##### *Pasos de un sistema de visión artificial*



*Nota.* En el gráfico se muestran los pasos que generalmente se siguen para procesar una imagen.

- **Captura de imágenes:** Consiste en que el dispositivo de captura produzca una señal eléctrica proporcional al nivel de energía detectado en su ángulo de visión (Sucar & Gómez), para posteriormente generar la imagen binaria que es almacenada con un determinado formato en la memoria de video (RAM). La imagen resultante depende de la calidad de la iluminación y de las características del dispositivo de captura.
- **Preprocesamiento:** El objetivo del preprocesamiento es mejorar la interpretabilidad y calidad de la imagen para los seres humanos o preparar la imagen para ser utilizada en la etapa de extracción de características, para lograrlo se utilizan técnicas como conversión a escala de grises, histogramas, composición de color, etc. (Shell & Hall, 2000).
- **Extracción de características:** Es la parte que realiza el análisis y la segmentación, su objetivo es identificar los bordes de la imagen para extraer los objetos o regiones de interés del fondo (Shell & Hall, 2000). También se puede realizar la extracción de colores mediante el análisis de los modelos de color como RGB o HSV.
- **Algoritmos de clasificación:** Se emplean el aprendizaje automático, para hacerlo se debe disponer de una base de datos conformada por una gran cantidad y variedad de imágenes de entrenamiento y validación. Como herramienta se utilizan redes neuronales, las cuales están compuestas de modelos (capas organizadas de acuerdo con una arquitectura) que incluyen sesgos y pesos los cuales son continuamente reajustados durante una etapa conocida como entrenamiento hasta obtener la respuesta deseada.
- **Toma de decisiones:** Una vez se haya entrenado el modelo, se obtienen los pesos y sesgos óptimos, así se puede clasificar los objetos de las imágenes en diferentes categorías o clases.

- **Acción:** La respuesta de la clasificación del sistema de visión artificial se puede enviar a una máquina, o red para activar los actuadores y realizar la acción requerida de acuerdo con la aplicación.

### ***Aplicaciones de la visión artificial***

Las aplicaciones de la visión artificial a nivel industrial se pueden agrupar en las siguientes:

- **Robótica móvil y vehículos autónomos:** Son sistemas inteligentes que utilizan cámaras y sensores para reconocen obstáculos, objetos, personas, caminos, señalética etc. (Sucar & Gómez) Su función es realizar tareas como navegación, guía, rastreo, determinación de amenazas y evasión de obstáculos (Shell & Hall, 2000).
- **Manufactura:** Se utiliza en varias aplicaciones como la inspección sea localización y verificación de agujeros, dimensionamiento dimensional, espesor de partes, medición de componentes, localización de defectos, precisión de contornos de superficies. Otra aplicación es la identificación de partes y clasificación que incluye tareas como clasificación de objetos, reconocimiento de formas, monitoreo de inventariado, recolección en cintas transportadoras y recolección de basura (Shell & Hall, 2000).

### **Controladores lógicos programables**

Un controlador lógico programable (PLC) es un dispositivo electrónico que usa una memoria programable que almacena instrucciones e implementa funciones para controlar dispositivos de salida como motores en base a las condiciones de dispositivos de entrada como sensores o elementos de mando. Se concibieron a para sustituir la lógica cableada y al ser dispositivos reprogramables no hay la necesidad de modificar físicamente las conexiones cableadas si se desea realizar algún cambio en el funcionamiento del sistema/planta. Los PLCs son similares a las computadoras, pero también poseen ciertas características particulares como:

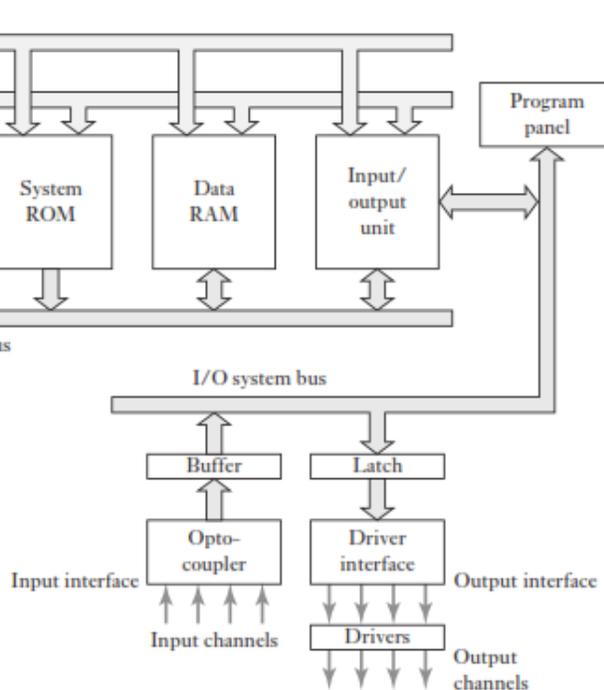
- Son robustos y están diseñados para soportar vibraciones, temperatura, humedad y ruido.
- Las interfaces para entradas y salidas se encuentran dentro del controlador.
- Son fáciles de programar

(Bolton, 2015)

La arquitectura de los PLCs se presenta en la figura 16, en ella se muestra que están constituidos principalmente por una unidad de procesamiento central (CPU), memorias RAM y ROM, interfaces de entradas y salidas y un reloj cuya frecuencia está entre 1 y 8 MHz y es el elemento que determina a qué velocidad va a operar el PLC, así como la temporización y sincronización de todos los elementos que lo constituyen (Bolton, 2015).

**Figura 16**

*Arquitectura de un PLC*



*Nota.* Imagen obtenida de: (Bolton, 2015)

## **Sistemas de comunicación**

Los sistemas de comunicación se constituyen por los buses (conjunto de líneas de transmisión de señales) y protocolos con que los PLCs, computadoras y otros periféricos se interconectan para conformar una red.

### ***Modelo OSI***

Es un modelo desarrollado por la International Organization for Standardization (ISO) que define un protocolo de 7 capas conocido como modelo Open Systems Interconnection (OSI), el modelo OSI sirve como framework para desarrollar protocolos de comunicación, a continuación, se describen las 7 capas que lo conforman como se muestra en la figura 17.

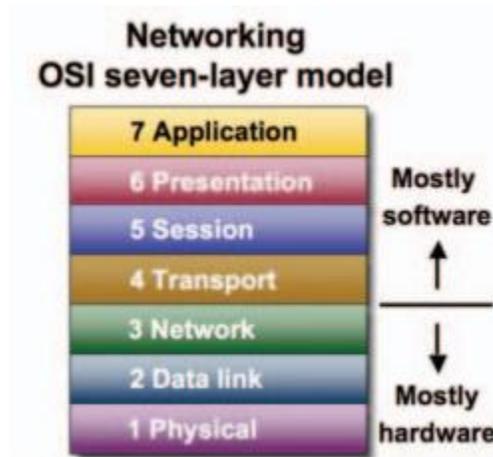
- **Capa física:** Consiste en la transmisión de bits desde y hacia los componentes físicos que constituyen una red, por lo tanto, define el hardware requerido como tipo de cable, conectores, niveles de señal y sincronización de datos.
- **Capa de enlace de datos:** Define los protocolos que se usan para enviar, recibir mensajes, detectar y corregir de errores, se encarga de organizar la información en paquetes para ser transferidos y también del control de acceso a la red.
- **Capa de red:** Administra el direccionamiento, enrutamiento y control de mensajes, en esta capa se usa el Internet Protocol (IP) y Novells Internetwork Packet Exchange (IPX).
- **Capa de transporte:** Se encarga mantener una conexión entre emisor y receptor para transportar los mensajes de manera confiable, en esta capa se usan los protocolos Internet Transmission Control Protocol (TCP) y Novells Sequenced Packet Exchange (SPX).
- **Capa de sesión:** Se encarga del establecimiento de “diálogos” entre dos dispositivos conectado a una red mediante el inicio o cierre de sesiones.

- Capa de procesamiento: Es la capa que decodifica los datos transmitidos para que la última capa sea capaz de manipularlos.
- Capa de aplicación: Comprende los servicios de red y aplicaciones, también sirve para definir los protocolos usados para la transferencia de archivos o correos electrónicos entre estaciones conectadas a una red.

(Bolton, 2015)

**Figura 17**

*Capas del modelo OSI*



*Nota.* En el gráfico se muestran las siete capas que constituyen el modelo OSI. Imagen obtenida de:

(Global Knowledge)

### **Modelo TCP/IP**

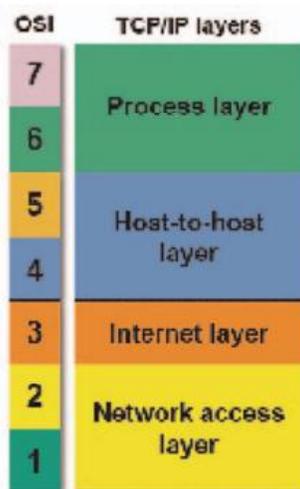
En las redes industriales se suele trabajar con el modelo TCP/IP que es una simplificación del modelo OSI, cuenta con las siguientes capas:

- Capa de acceso a la red: Incluye las capas 1, 2 del modelo OSI
- Capa de internet: Incluye la capa 3 del modelo OSI
- Capa de host a host: Usa las capas 4 y 5 del modelo OSI
- Capa de aplicación: Usa las capas 6 y 7 del modelo OSI

En la figura 18 como se relaciona el modelo TCP/IP con el modelo OSI

**Figura 18**

*Relación entre las capas del modelo OSI y modelo TCP/IP*



*Nota.* En el gráfico se muestra la dualidad entre las capas del modelo OSI y las capas del modelo TCP/IP.

Imagen obtenida de: (Global Knowledge)

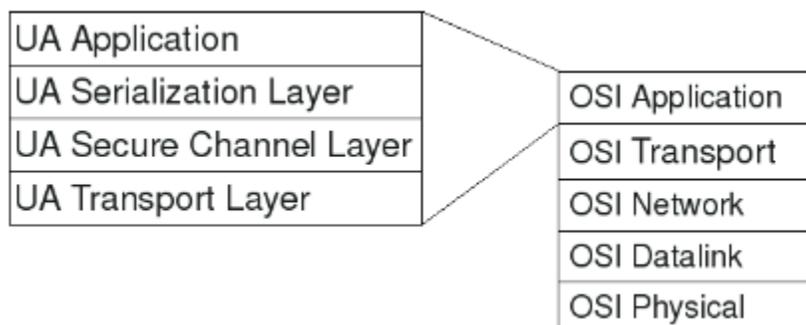
### **OPC Unified Architecture (UA)**

Es un estándar desarrollado por la OPC Foundation para intercomunicar máquinas o sistemas heterogéneos de manera segura, confiable. OPC UA es la última generación de la tecnología OPC (OLE for Process Control), fue concebido en el año 2003 en estrecha colaboración con los fabricantes, usuarios e investigadores de los principales sistemas industriales como una arquitectura orientada a los servicios que mejora la interoperabilidad del OPC clásico y permite la integración con las tecnologías emergentes como IoT e Industria 4.0, finalmente fue lanzado en el año 2008 (OPC Foundation).

OPCUA se localiza en la capa de aplicación del modelo OSI y TCP/IP (ver figura 19), aunque algunas de las capas propias de OPCUA realizan funciones que ya se cumplen en el modelo OSI como la de transporte que se repite para poder establecer una sesión entre dos dispositivos.

**Figura 19**

*Pila de OPCUA en el modelo OSI*



*Nota.* En el gráfico se muestran las capas del estándar de comunicación OPC UA y como estas se localizan en la capa de aplicación del modelo OSI. Imagen obtenida de: (Post, Sepalla, Koivisto, & Hannu, 2009)

### **Comunicación Cliente-Servidor OPCUA**

Es un tipo de comunicación basada en el paradigma de arquitectura orientada a servicios. Es decir, no intercomunica los dispositivos mediante tramas de bits o bytes, sino que usa servicios en forma de métodos, por ejemplo, el cliente puede solicitar al servidor lectura, escritura o búsqueda, de esta forma el servidor se encarga de proveer la información que el cliente requiere de forma más sencilla y práctica.

Se pueden usar los siguientes protocolos:

- UA TCP: protocolo que existe de dentro de TCP y especifica la estructura y encriptación de los paquetes que se transfieren entre el cliente y servidor (Rinaldi, 2019).

- HTTPS/WebSockets +JSON: trabaja bien con aplicaciones relacionadas con internet.

Uno de los objetivos de OPCUA es fomentar el intercambio seguro y determinístico de información en dispositivos y equipos de campo, la Fiel Level Communication (FLC) de sus siglas en inglés o la Comunicación a Nivel de Campo, describe los niveles de integración como son:

Integración horizontal:

- Controlador a controlador (C2C)
- Máquina a máquina (M2M)

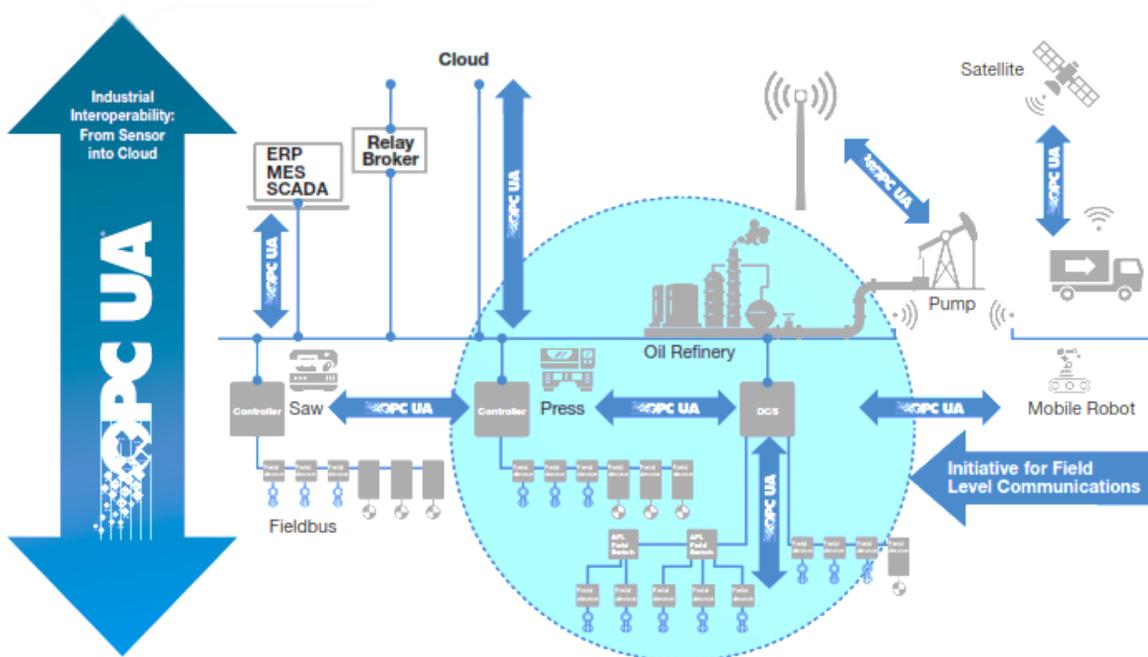
Integración horizontal:

- Controlador a dispositivo (C2D)
- Desde sensores/actuadore/controladores a sistemas de tecnologías de la información o a la nube

(OPC Foundation)

**Figura 20**

*Iniciativa Fiel Level Communication (FLC) de OPCUA*



*Nota.* En la figura se presenta la compatibilidad de protocolo OPC UA con prácticamente todos los protocolos de comunicación de bus de campo y Ethernet. Además, de mostrar la amplia gama de aplicaciones en las que se podría implementar. Imagen obtenida de: (OPC Foundation)

**Resumen**

En el capítulo se exploraron los fundamentos teóricos necesarios para que el lector pueda tener una visión general de los temas de interés que se abordan en las etapas de diseño e implementación del proyecto. Para empezar, se presentó la definición de las líneas de producción industriales, para a continuación, exponer las generalidades de las bandas transportadoras, sistemas de dosificación industrial, sistemas de clasificación industrial y PLCs. En lo que respecta a visión artificial se abordaron sus aplicaciones en la industria y cuáles son sus etapas generales para el desarrollo de aplicaciones prácticas. También se incluyeron las comunicaciones industriales y se repasaron las capas del modelo OSI y TCP/IP para al final explicar el estándar OPCUA y la comunicación cliente-servidor que ofrece la misma.

## Capítulo III

### Diseño Mecatrónico

En el capítulo se definirá el concepto que satisface los objetivos del proyecto por medio del diseño mecatrónico aplicando la metodología de la norma VDI 2206. Se establecerán los subsistemas que conforman el proyecto. De modo que, se dimensionarán, seleccionarán y analizarán los componentes que los conforman.

#### Definición de las necesidades

Las necesidades del usuario se concibieron en base a los 39 parámetros de contradicción de Altshuller (Gadd, 2011), de esta manera se simplificó el problema al considerarlo como un sistema que se pueda abordar de manera sistemática. Después de un minucioso análisis de los 39 parámetros, se logró distinguir 9 necesidades críticas para la implementación de un módulo didáctico que emule un proceso industrial descritas en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Necesidades del usuario establecidas y parámetros de Altshuller considerados.*

N.º	Necesidades	Parámetros de Altshuller
1	Discretización por tipo de material, colores o defectos	Pérdida de información (24), Fiabilidad (27), Precisión de medición (28), Dificultad de detección y medición (37)
2	Fácil calibración de los sensores a utilizar	Pérdida de información (24), Fiabilidad (27), Facilidad de manufactura (32)
3	Modular y compacto	Área del objeto estacionario (6), Volumen de objeto estacionario (8), Forma (12), adaptabilidad (35)
4	Fácil operación	Fiabilidad (27), facilidad de operación (32)
5	Fácil mantenimiento	Facilidad de reparación (34)

N.º	Necesidades	Parámetros de Altshuller
6	Tipo de transporte de materiales	Peso de objeto estacionario (2), Velocidad (9), Fuerza (10), Tensión o presión (11), Potencia (21), Pérdidas de energía (22), Facilidad de manufactura (32)
7	Tipo de método para clasificar	Intensidad de iluminación (18), Pérdida de información (24), Adaptabilidad o versatilidad (35)
8	Colocar las probetas de forma automática en la banda	Fuerza (10), Tensión o presión (11), Potencia (21), Complejidad del dispositivo (36), Alcance de automatización (38)
9	Retirar las probetas clasificadas de forma automática en recipientes	Fuerza (10), Tensión o presión (11), Potencia (21), Complejidad del dispositivo (36), Alcance de automatización (38)

*Nota.* Cada parámetro de Altshuller está acompañado de un número entre paréntesis que representa su posición en el Apéndice I (Apéndice 1) de la matriz de contradicción de la teoría TRIZ (Córdova Ames, 2008).

### **Definición de los requerimientos**

Para definir los requerimientos técnicos en base a las necesidades de la tabla 1 se consideró la condición más influyente que podría satisfacer la necesidad presentada. A continuación, en la tabla 2 se detalla lo descrito:

**Tabla 2***Definición de los requerimientos*

N°	Necesidades	Requerimientos
1	Discretización por tipo de material, colores o defectos	Selección de los sensores
2	Fácil calibración de los sensores a utilizar	Tipo de acondicionamiento de los sensores
3	Modular y compacto	Ensamblaje con uniones desmontables y optimización de espacio
4	Fácil operación	Panel de control
5	Fácil mantenimiento	Facilidad de mantenimiento
6	Tipo de transporte de materiales	Banda transportadora
7	Tipo de método para clasificar	Visión artificial
8	Colocar las probetas de forma automática en la banda	Mecanismos capaces de colocar las probetas en la banda transportadora
9	Retirar las probetas clasificadas de forma automática en recipientes	Mecanismos capaces de retirar las probetas de la banda transportadora

*Nota.* En la tabla se enlistan las necesidades y requerimientos técnicos necesarios para establecer la composición del módulo didáctico.

### **Planificación del producto**

El análisis de las relaciones entre las necesidades y los requisitos de diseño se presentan en la matriz QFD (tabla 3), donde se calificaron las necesidades del cliente en una escala del 1 al 5, siendo 5 de mayor relevancia y 1 de menor relevancia. Y a su vez, se definieron los compromisos técnicos entre los requerimientos para finalmente determinar el orden de prioridad de los mismos. Para ello se empleó una escala del 1 al 9, donde 1 es poco importante y 9 muy importante.

Tabla 3

## Casa de la calidad

			<table border="1" style="float: right; margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="background-color: black; color: white;">Correlaciones</td><td></td></tr> <tr><td>Positiva</td><td style="text-align: center;">+</td></tr> <tr><td>Negativa</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td>No hay correlación</td><td></td></tr> </table>										Correlaciones		Positiva	+	Negativa	-	No hay correlación																																																																																																																																																																				
Correlaciones																																																																																																																																																																																							
Positiva	+																																																																																																																																																																																						
Negativa	-																																																																																																																																																																																						
No hay correlación																																																																																																																																																																																							
			<table border="1" style="float: right; margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="background-color: black; color: white;">Relaciones</td><td></td></tr> <tr><td style="color: red;">Relación Fuerte</td><td style="text-align: center;">9</td></tr> <tr><td style="color: green;">Relación Media</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="color: blue;">Relación Débil</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td>No existe relación</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> </table>										Relaciones		Relación Fuerte	9	Relación Media	3	Relación Débil	1	No existe relación	0																																																																																																																																																																	
Relaciones																																																																																																																																																																																							
Relación Fuerte	9																																																																																																																																																																																						
Relación Media	3																																																																																																																																																																																						
Relación Débil	1																																																																																																																																																																																						
No existe relación	0																																																																																																																																																																																						
			<table border="1" style="float: right; margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="background-color: black; color: white;">Requerimientos del cliente</td><td>Calif.</td><td>%</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Discretización por tipo de material, colores o defectos</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">13.89</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">9</td></tr> <tr><td>Fácil calibración de los sensores a utilizar</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">8.33</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td>Modular y compacto</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">5.56</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td>Fácil operación</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">13.89</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td>Fácil mantenimiento</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">8.33</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td>Tipo de transporte de materiales</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">13.89</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td>Visión artificial</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">11.11</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td>Colocar las probetas de forma automática en la banda</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">11.11</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">9</td><td style="text-align: center;">0</td></tr> <tr><td>Retirar las probetas clasificadas de forma automática en recipientes</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">13.89</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">9</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: center;"><b>36</b></td><td style="text-align: center;"><b>100</b></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: right;"><b>Importancia</b></td><td></td><td></td><td style="text-align: center;">330.56</td><td style="text-align: center;">244.44</td><td style="text-align: center;">227.78</td><td style="text-align: center;">255.56</td><td style="text-align: center;">241.67</td><td style="text-align: center;">422.22</td><td style="text-align: center;">294</td><td style="text-align: center;">225.00</td><td style="text-align: center;">347.22</td><td style="text-align: center;"><b>2588.89</b></td></tr> <tr><td style="text-align: right;"><b>Importancia en porcentaje (%)</b></td><td></td><td></td><td style="text-align: center;">12.77</td><td style="text-align: center;">9.44</td><td style="text-align: center;">8.80</td><td style="text-align: center;">9.87</td><td style="text-align: center;">9.33</td><td style="text-align: center;">16.31</td><td style="text-align: center;">11</td><td style="text-align: center;">8.69</td><td style="text-align: center;">13.41</td><td style="text-align: center;"><b>100.00</b></td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Posición (Donde 9 muy importante y 1 es poco importante)</td><td></td><td></td><td style="text-align: center;"><b>7</b></td><td style="text-align: center;"><b>4</b></td><td style="text-align: center;"><b>2</b></td><td style="text-align: center;"><b>5</b></td><td style="text-align: center;"><b>3</b></td><td style="text-align: center;"><b>9</b></td><td style="text-align: center;"><b>6</b></td><td style="text-align: center;"><b>1</b></td><td style="text-align: center;"><b>8</b></td><td></td></tr> </table>										Requerimientos del cliente	Calif.	%										Discretización por tipo de material, colores o defectos	5	13.89	9	0	0	3	0	9	9	3	9	Fácil calibración de los sensores a utilizar	3	8.33	9	9	3	1	1	1	0	0	0	Modular y compacto	2	5.56	0	3	9	1	9	3	1	3	3	Fácil operación	5	13.89	0	0	0	9	3	1	1	3	3	Fácil mantenimiento	3	8.33	1	3	3	3	9	3	1	3	3	Tipo de transporte de materiales	5	13.89	1	3	3	1	3	9	3	0	1	Visión artificial	4	11.11	3	1	1	1	0	3	9	0	0	Colocar las probetas de forma automática en la banda	4	11.11	3	3	3	1	1	3	0	9	0	Retirar las probetas clasificadas de forma automática en recipientes	5	13.89	3	3	3	1	1	3	0	0	9		<b>36</b>	<b>100</b>										<b>Importancia</b>			330.56	244.44	227.78	255.56	241.67	422.22	294	225.00	347.22	<b>2588.89</b>	<b>Importancia en porcentaje (%)</b>			12.77	9.44	8.80	9.87	9.33	16.31	11	8.69	13.41	<b>100.00</b>	Posición (Donde 9 muy importante y 1 es poco importante)			<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	
Requerimientos del cliente	Calif.	%																																																																																																																																																																																					
Discretización por tipo de material, colores o defectos	5	13.89	9	0	0	3	0	9	9	3	9																																																																																																																																																																												
Fácil calibración de los sensores a utilizar	3	8.33	9	9	3	1	1	1	0	0	0																																																																																																																																																																												
Modular y compacto	2	5.56	0	3	9	1	9	3	1	3	3																																																																																																																																																																												
Fácil operación	5	13.89	0	0	0	9	3	1	1	3	3																																																																																																																																																																												
Fácil mantenimiento	3	8.33	1	3	3	3	9	3	1	3	3																																																																																																																																																																												
Tipo de transporte de materiales	5	13.89	1	3	3	1	3	9	3	0	1																																																																																																																																																																												
Visión artificial	4	11.11	3	1	1	1	0	3	9	0	0																																																																																																																																																																												
Colocar las probetas de forma automática en la banda	4	11.11	3	3	3	1	1	3	0	9	0																																																																																																																																																																												
Retirar las probetas clasificadas de forma automática en recipientes	5	13.89	3	3	3	1	1	3	0	0	9																																																																																																																																																																												
	<b>36</b>	<b>100</b>																																																																																																																																																																																					
<b>Importancia</b>			330.56	244.44	227.78	255.56	241.67	422.22	294	225.00	347.22	<b>2588.89</b>																																																																																																																																																																											
<b>Importancia en porcentaje (%)</b>			12.77	9.44	8.80	9.87	9.33	16.31	11	8.69	13.41	<b>100.00</b>																																																																																																																																																																											
Posición (Donde 9 muy importante y 1 es poco importante)			<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>8</b>																																																																																																																																																																												
Selección de los sensores	Tipo de acondicionamiento de los sensores	Ensamblaje con uniones desmontables y optimización de espacio	Panel de control	Facilidad de mantenimiento	Banda transportadora	Visión artificial	Mecanismos capaces de colocar las probetas en la banda transportadora	Mecanismos capaces de retirar las probetas de la banda transportadora																																																																																																																																																																															
+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+																																																																																																																																																																											

Nota. Desarrollo de la matriz de la casa de la calidad

Después de obtener los resultados de la matriz QFD, se organiza el proyecto en cuatro subsistemas y se presentan los hitos relacionados con las necesidades para cada uno de ellos como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Subsistemas del proyecto*

N.º	Subsistema	Función	Hitos
1	Transporte	Transportar las probetas	5, 6, 4
2	Dosificador automático	Colocación de probeta en la banda transportadora	8, 3, 5, 4
3	Clasificación	Evacuación de las probetas clasificadas	9, 3, 5, 4
4	Reconocimiento	Identificar naturaleza y características físicas de las probetas.	7, 1, 2, 5, 4

*Nota.* En la tabla se presentan los subsistemas que componen el módulo didáctico y sus hitos. Para establecer los subsistemas se consideró las etapas que generalmente se presentan en la industria. A su vez, los hitos se ordenaron de acuerdo al nivel de importancia establecido posterior al análisis de la matriz QFD.

**Diseño general**

Para realizar el diseño del proyecto, se partió de las características descritas en la tabla 5, cuya definición se basó en el objetivo de presentar un módulo didáctico que tenga los componentes generalmente empleados en la industria.

**Tabla 5***Características generales del proyecto*

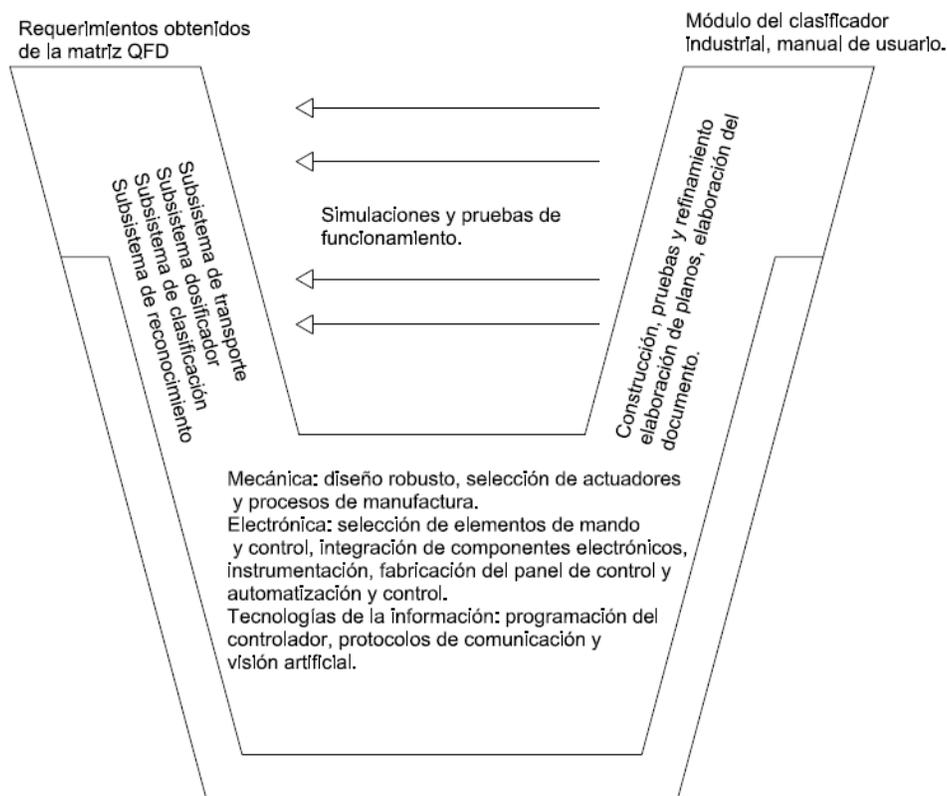
Característica	Descripción
Dimensiones de la banda transportadora	Distancia entre los rodillos: 1440 mm Altura: 770 mm
Ancho de la cinta	370 mm
Velocidad de la banda	20 RPM
Tipo de motor para la banda	Motorreductor trifásico
Tipo de control para el motor	Variador de frecuencia
Dimensiones de las probetas	30 mm de diámetro y 30 mm de alto
Materiales de las probetas	Acero al carbono estructural ASTM A36 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
Tipo de controlador	Controlador lógico programable (PLC)
Parámetros de clasificación	Material (metal o no metal) Colores Defectos visibles

*Nota.* En la tabla se definieron las características y parámetros a considerarse para el diseño.

En lo que respecta a la metodología para la fase de diseño, se optó por aplicar la norma VDI 2206, debido a que permite integrar de manera ordenada los dominios: mecánico, electrónico y de TI de cada subsistema. En la figura 21 se muestra el modelo en V del proyecto.

Figura 21

Modelo en V del proyecto

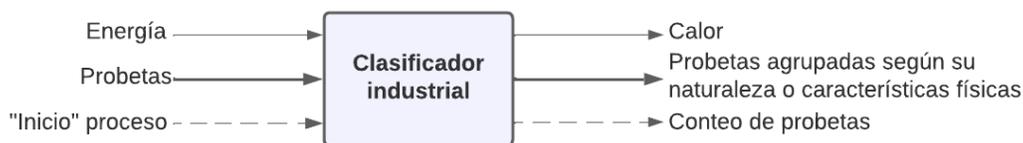


*Nota.* En la figura se muestra el modelo en V del proyecto. Se definió como requerimientos los mismos de la matriz QFD, para el diseño a nivel sistema se establecieron los subsistemas que constituyen el módulo didáctico, posterior se establecieron los dominios necesarios para el diseño para a continuación fijar los medios donde se integran para finalmente someter a la validación por medio de simulaciones y pruebas de funcionamiento del módulo didáctico.

A partir de las características generales se conceptualizó el proyecto como una caja negra de la figura 22 para resolver el problema de forma sencilla al descomponerlo en subfunciones que se presentan en la figura 23.

Figura 22

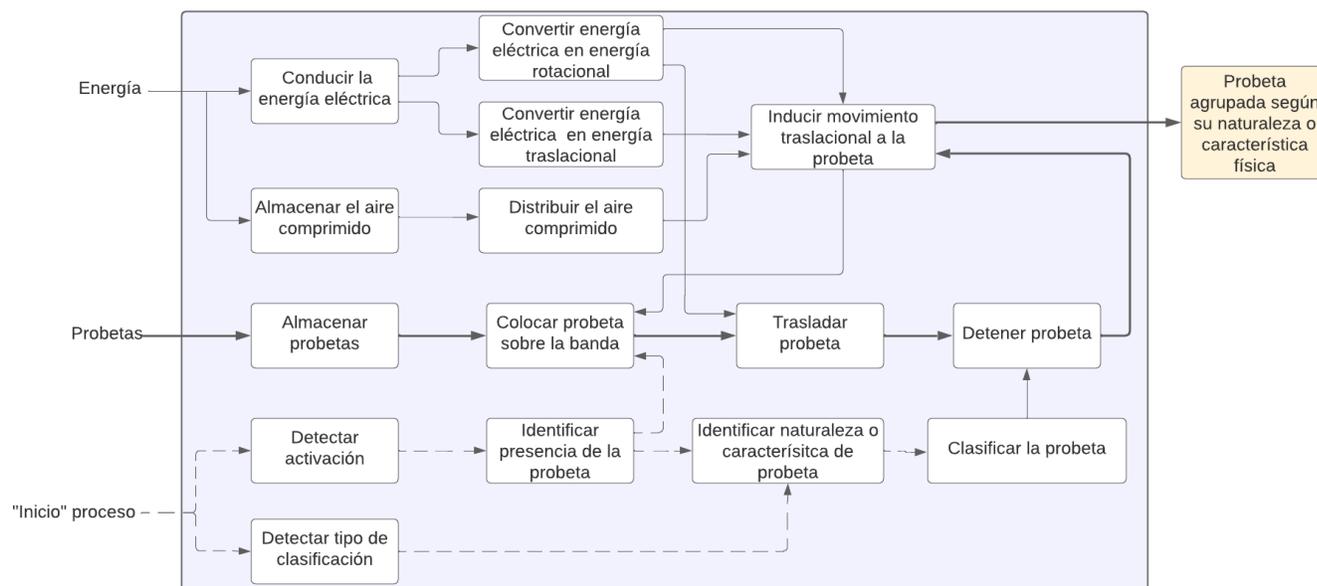
Representación del problema como una caja negra



*Nota.* En el gráfico se muestra el problema como una caja negra. A la entrada de la caja negra se tiene la energía con la que alimentará el módulo didáctico, las probetas y una señal de inicio del proceso.

Figura 23

Diagrama funcional

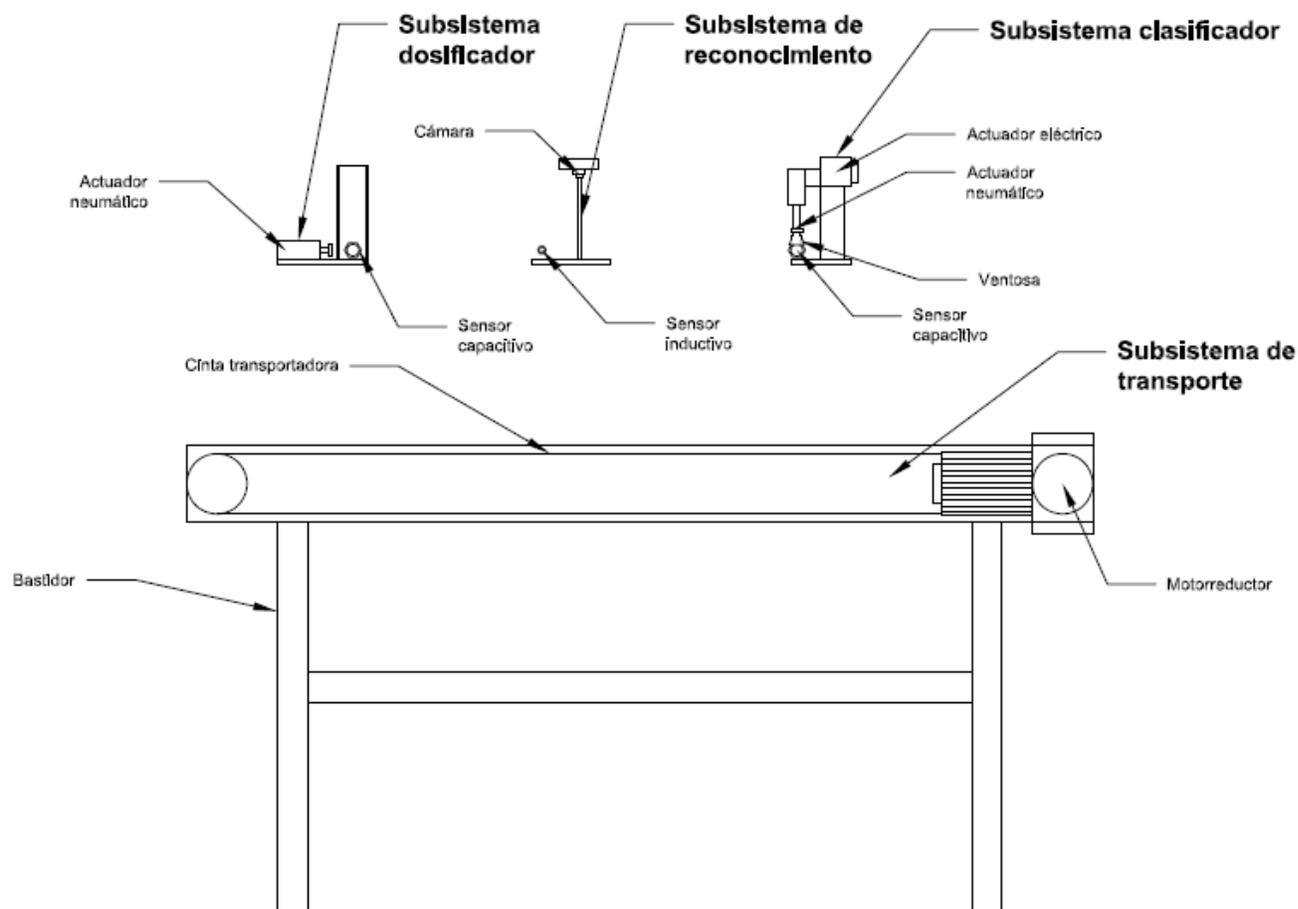


*Nota.* En la figura se muestra como las entradas de la caja negra intervienen en el funcionamiento y la obtención de la salida. Es decir, como se obtienen probetas agrupadas según su naturaleza o características físicas.

De acuerdo con la figura 23 y a la tabla 4 se generó el concepto considerando la relación e interacción entre estos. Además, se definieron las disposiciones y tipos de componentes necesarios para cumplir con las características generales de la tabla 5 del proyecto. El concepto generado se presenta en la figura 24, donde se indican los subsistemas definidos en la tabla 4 y sus principales componentes.

Figura 24

*Bosquejo conceptual*



*Nota.* En la figura se representa de manera general la composición del proyecto.

### **Descripción:**

Subsistema de transporte: compuesto por un motorreductor el cual impulsará la cinta de la banda transportadora cuya estructura será soportada por un bastidor. Además, el control se realizará por medio de un variador de frecuencia.

Subsistema de dosificación automática: conformado por un actuador neumático encargado de empujar la probeta almacenada en un contenedor por una rampa para colocarla sobre la cinta de la banda transportadora. A su vez, un sensor indicará la presencia de la probeta para que el actuador neumático realice su función.

Subsistema de reconocimiento: constituido por un sensor de presencia, el cual indicará la naturaleza de la probeta (metal o no metal), una cámara web, la cual capturará una fotografía de la cara superior de la probeta para identificar las características físicas visibles de la misma (color o defecto).

Subsistema de clasificación: conformado por un actuador neumático con una ventosa el cual se desplazará verticalmente para elevar la probeta y transportarla a uno de los contenedores ubicados a los lados de la banda transportadora cuyo desplazamiento se generará gracias a un actuador eléctrico.

### **Diseño del subsistema de transporte**

#### ***Selección del método de transporte***

La función que desempeña el subsistema de transporte es mover las probetas desde el área de despacho hasta el área de clasificación. A continuación, se presenta la tabla 6 donde se indican las ventajas y desventajas de los dos principales sistemas de transporte de productos que son: con base de deslizamiento con rodillos y con base de deslizamiento con chapa. Esto con el fin de seleccionar el más adecuado para la presente aplicación.

**Tabla 6**

*Comparación entre los métodos de transporte de productos*

Método de transporte	Ventajas	Desventajas
Base de deslizamiento con rodillos	Manejo ágil del producto.	Utilizada para grandes distancias
	Reducción de pérdidas por fricción.	Utilizada para cargas grandes
	Demanda de potencia de accionamiento reducida.	Costo elevado
Base de deslizamiento con chapa	Utilizada para todo tipo de distancias	Mayor demanda de energía Pérdidas por fricción

Método de transporte	Ventajas	Desventajas
	Utilizada para cargas livianas o medianas	Menor rendimiento por condiciones no deseadas (polvo, humedad)
	Variedad de tipos de bandas	Menor vida útil de las bandas
	Costo moderado	

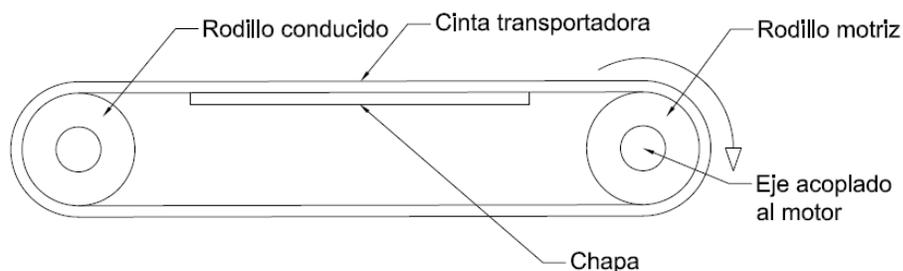
*Nota:* En la tabla se muestran las ventajas y desventajas de los distintos bases de deslizamiento de las bandas transportadoras.

Posterior al análisis de la tabla 6, se concluye que el método más conveniente y viable para transportar las probetas, es utilizar una base de deslizamiento con chapa porque es para una distancia reducida, para cargas livianas y tiene un menor costo de fabricación. Aunque la banda transportadora va a requerir de mantenimiento y a largo plazo la cinta va a tener que ser reemplazada cumple con los requerimientos del proyecto.

Por lo tanto, se planteó usar una banda transportadora que este conformada por dos rodillos: un rodillo motriz, compuesto por un eje al que se acopla el motor y un rodillo conducido, el cual tiene la función de tensar y guiar la cinta. El funcionamiento de la banda se presenta en la figura 25.

**Figura 25**

*Esquema del funcionamiento de la banda transportadora*



*Nota.* En la figura se muestra la composición de la banda transportadora.

### **Cálculos de probetas**

Como se mencionó en la tabla 5, los materiales de las probetas deben ser de ABS y ASTM A36, debido a que un sensor inductivo detectará si un material es metálico o no metálico. A continuación, se procedió a calcular el peso de las probetas a partir dimensiones propuestas en la tabla 5 que son: radio igual a 15 mm y altura igual a 30 mm.

Se partió calculando el volumen de las probetas con la ecuación 3.1.

$$v = \pi r^2 a \quad (3.1)$$

Donde:

$v$  = volumen de la probeta ( $mm^3$ )

$r$  = radio de la probeta ( $mm$ )

$a$  = área de la probeta ( $mm^2$ )

$$v = 2.121 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

Las densidades del ABS y acero ASTM A36 son de  $\rho_{ABS} = 1.05 \text{ g/cm}^3$  y  $\rho_{A36} = 7.85 \text{ g/cm}^3$  respectivamente, con estos datos es posible calcular la masa de cada probeta utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3 respectivamente:

$$m_{ABS} = v\rho_{ABS} \quad (3.2)$$

Donde:

$m_{ABS}$  = masa de la probeta de ABS ( $g$ )

$v$  = volumen de la probeta ( $cm^3$ )

$\rho_{ABS}$  = densidad del ABS ( $g/cm^3$ )

$$m_{ABS} = 22.266 \text{ g}$$

$$m_{A36} = v\rho_{A36} \quad (3.3)$$

Donde:

$m_{A36}$  = masa de la probeta de A36 ( $g$ )

$v$  = volumen de la probeta ( $cm^3$ )

$\rho_{A36}$  = densidad del A36 ( $g/cm^3$ )

$$m_{A36} = 166.465 \text{ g}$$

### **Selección de la cinta transportadora**

La cinta transportadora es el elemento mecánico flexible usado para mover las probetas a manera de un proceso de producción. Los principales tipos de cintas que se usan para el tipo de aplicación mencionado se subdividen en: lisas, con nervios en V y modulares. El siguiente punto trata la selección de la cinta más adecuada, a continuación, se presenta la tabla 7 donde se indican las ventajas y desventajas del uso de cada una.

**Tabla 7**

*Selección de las cintas según su tipo de superficie*

Tipo de cintas según su superficie	Ventajas	Desventajas
Lisa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente a atmosferas abrasivas</li> <li>• Una transmisión de potencia eficiente</li> <li>• Facilidad de montaje y desmontaje</li> <li>• Versátil y para una gran cantidad de aplicaciones</li> <li>• Menos costosa que otros tipos de cintas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las piezas pueden a caerse o resbalarse</li> <li>• La cinta puede dañarse si se sobrecargada</li> <li>• La cinta requiere de mantenimiento frecuente</li> <li>• Su uso se limita a instalaciones horizontales o con mínimos ángulos de inclinación</li> </ul>

Tipo de cintas según su superficie	Ventajas	Desventajas
Con nervios en "V"	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede usar en instalaciones con elevados ángulos de inclinación</li> <li>• Impide el corrimiento de material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de rodillos especiales para que la banda retorne</li> <li>• Presenta una distancia entre centros limitada</li> </ul>
Modular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta una buena absorción de las vibraciones</li> <li>• Alarga la vida útil del resto de componentes</li> <li>• Es un tipo de banda sólida y duradera</li> <li>• Puede transportar desde piezas medianas a grandes</li> <li>• Se la utiliza en líneas de montaje y otros procesos de producción</li> <li>• Fácil reconfiguración de dirección y longitud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene un costo elevado comparada con otros tipos de cintas</li> <li>• No sirve para transportar material granulado</li> <li>• Presenta una distancia entre centros limitada</li> </ul>

*Nota:* En la tabla se mencionan los tipos de cintas según su superficie.

Teniendo en cuenta las opciones que se presentaron en la tabla 7, se concluye que la opción más viable es usar una cinta lisa debido a su variedad de aplicaciones, su facilidad de montaje/

desmontaje y bajo costo. Sin embargo, debido a que las piezas pueden resbalarse, se requiere adicionalmente que la cinta que se elija tenga una superficie antideslizante. Por consiguiente, la cinta que cumple con las especificaciones mencionadas es una recubierta de PVC sintético con 2 lonas de nylon y espesor de 3 mm (ver figura 26).

**Figura 26**

*Tipo de material para cinta*

**3.1.- Tipo liviana "LIGHT DUTY" cubierta de PVC (FDA), para uso industrial y alimenticio.**

Colores	Nº Lona	Espesores	Banda	Longitud	Observaciones
Blanco	2 - 3	3 - 4 mm	2" hasta 60"	hasta 100 mts	FDA
Azul	2 - 3	3 - 4 mm	2" hasta 60"	hasta 100 mts	FDA
Verde	2 - 3	3 - 4 mm	2" hasta 60"	hasta 100 mts	FDA

**Nota:** Tipo de unión flexco vulcanizado frío y calor vipal



*Nota.* Imagen obtenida de: Catálogo de Bandas & Cribas.

### **Selección de los rodillos**

Concerniente a la selección de los rodillos, es necesario conocer su capacidad de carga la cual es el peso de la cinta dividido entre el número de rodillos que se utilizan.

A continuación, se calcula el peso de la banda, sin embargo, al no ser entregado por los fabricantes **esta solo es una estimación basada en la densidad del PVC sintético**. Puesto a que se necesita maximizar el área de contacto de los rodillos con la banda, se decidió usar rodillos de 4 pulgadas de diámetro.

Los diámetros de los rodillos motriz y conducido son los mismos, entonces el ángulo de contacto según la ecuación 3.4 es igual a 180 grados.

$$\varphi = \pi - 2\text{sen}^{-1} \frac{d - d}{2C} \quad (3.4)$$

Donde:

$\varphi$  = ángulo de contacto (rad)

$d$  = diámetro de los rodillos ( $m$ )

$C$  = distancia entre los rodillos ( $m$ )

$$\varphi = \pi \text{ rad}$$

De este modo ya se puede calcular la longitud requerida de la cinta que de acuerdo con la ecuación 3.5 es:

$$L = [4C^2 - (2d)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2}(2d)\varphi \quad (3.5)$$

Donde:

$L$  = longitud requerida ( $m$ )

$d$  = diámetro de los rodillos ( $m$ )

$C$  = longitud entre centros de los rodillos ( $m$ )

$\varphi$  = ángulo de contacto ( $rad$ )

$$L = 3.192 \text{ m}$$

De acuerdo con los requerimientos de la tabla 5, la cinta tiene un ancho de:

$$b = 370 \text{ mm}$$

Y según los datos de la figura 26 que remiten al catálogo del fabricante, el espesor de la cinta es:

$$t = 3 \text{ mm}$$

Por tanto, el volumen de la cinta es:

$$v_{cinta} = (3.192m)(0.37m)(0.003m)$$

$$v_{cinta} = 3.543 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

La densidad específica de la cinta de PVC sintético es de  $\gamma_o = 1400.6 \text{ kg/m}^3$ , entonces su peso estimado para el presente caso de estudio se calcula con la ecuación 3.6:

$$W_{cinta} = \gamma_o v_{cinta} \quad (3.6)$$

Donde:

$W_{cinta}$  = peso de la cinta ( $kg$ )

$\gamma_o$  = densidad del PVC sintético ( $kg/m^3$ )

$v_{cinta}$  = volumen de la cinta ( $m^3$ )

$$W_{cinta} = 4.963 \text{ kg}$$

En efecto solo se van a usar dos rodillos, como resultado la capacidad de carga de cada uno se calcula con la ecuación 3.7:

$$Cc = \frac{W_{cinta}}{\#rodillos} \quad (3.7)$$

Donde:

$Cc$  = capacidad de carga por rodillo ( $kg/rodillo$ )

$W_{cinta}$  = peso de la cinta ( $kg$ )

$$Cc = 2.481 \text{ kg/rodillo}$$

Como resultado, se pudo comprobar que la carga por rodillo es mínima, por esta razón los rodillos pueden estar fabricados de cualquier material comercial, usualmente suele ser acero o aluminio. Por lo que se decidió usar un rodillo comercial de acero que tiene las características que se presentan en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Características de los rodillos comerciales*

Características	
Material	Acero ASTM A36
Diámetro	50 mm (2 pulg) a 219 mm (9 pulg)
Longitud	100 mm (3.9 pulg) a 2.4 m (94.5 pulg)
Capacidad de carga máxima	13 kN a 62 kN
Tratamiento superficial	Sin lubricante

Otras características	Bajo nivel de ruido, a prueba de abrasión con rodamientos de bolas de acero
-----------------------	---

*Nota.* Obtenida de: (JPYROLL, 2023)

### **Selección del método de tensado**

En cuanto a la calibración de las bandas transportadoras, se requiere que las cintas estén sometidas a una tensión que sea lo suficientemente grande para que uno de los dos lados tienda a ser una superficie recta. En concreto la cinta debe estar colocada previamente en los rodillos y mediante algún mecanismo, se debe cambiar la distancia entre ellos con el fin de tensar la cinta. En la tabla 9 se presentan los tipos de dispositivos de tensado junto con sus ventajas y desventajas.

**Tabla 9**

*Tipos de dispositivos para tensado*

Tipos de dispositivos para tensado	Ventajas	Desventajas
	Se puede tensar con resortes y actuadores neumáticos o hidráulicos	Se usa para transportar piezas/productos pesados
Tensor de fuerza constante	Se puede usar a plena carga si hay dos dispositivos tensores	Se aplican para bandas transportadoras largas Para utilizar tensión de gravedad mediante masas se requieren de más rodillos

Tipos de dispositivos para tensado	Ventajas	Desventajas
Tensor fijo	Se usa para bandas transportadoras pequeñas Se pueden tensar de manera manual	No se puede tensar durante el funcionamiento

*Nota.* En la tabla se mencionan las ventajas y desventajas de los tipos de tensores.

Así que a partir del análisis de la tabla 9, se puede concluir que el uso de tensores fijos es suficiente para el proyecto debido a que la banda transportadora maneja cargas livianas y no se requiere tensar la banda en pleno funcionamiento.

En particular el tensor fijo más sencillo es aquel que utiliza pernos que se encuentran a los lados del rodillo, mediante el ajuste de un perno se empuja el rodillo junto con sus cojinetes/chumaceras en una dirección y se tensiona la cinta. En definitiva, se ha decidido utilizar este tipo de método de tensado porque es de bajo costo y requiere de pocos componentes como un perno tensor, tuercas y un soporte. No obstante, hay que tener presente que este método de tensado requiere de un alineamiento preciso y de tensionados periódicos para compensar el estiramiento de la cinta.

### ***Cálculos del motor***

Referente al actuador para el subsistema de transporte, es necesario hacer referencia a las características generales del proyecto de la tabla 5 donde se indica que el motor debe ser trifásico y su velocidad debe ser controlada mediante un variador de frecuencia para que la velocidad de la flecha sea de 36 RPM. Como resultado se consiguió un motorreductor con las características que se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10***Características del motorreductor*

Característica	Descripción	Característica	Descripción
Marca del motor	LAFERT	Velocidad	1630 rpm
Número de fases	3	Frecuencia	60 Hz
Voltaje	208-230 V en configuración delta y 440-460 V en configuración estrella	Factor de potencia	0.7
Corriente	1.3 A en configuración delta y 0.65 A en configuración estrella	Relación de reducción	80:1
Potencia	0.25 Hp	Tipo de reducción	SRT

*Nota.* En la tabla se muestran las características técnicas del motor trifásico.

A continuación, se presentan los cálculos relacionados con el motor:

La potencia teórica del motor es de 0.25 Hp, sin embargo, es conveniente obtener la potencia útil con la siguiente ecuación 3.8.

$$H_u = \eta \varepsilon H_t \quad (3.8)$$

Donde:

$H_u$  = potencia útil ( $W$ )

$\eta$  = eficiencia del motor eléctrico

$\varepsilon$  = eficiencia mecánica del reductor

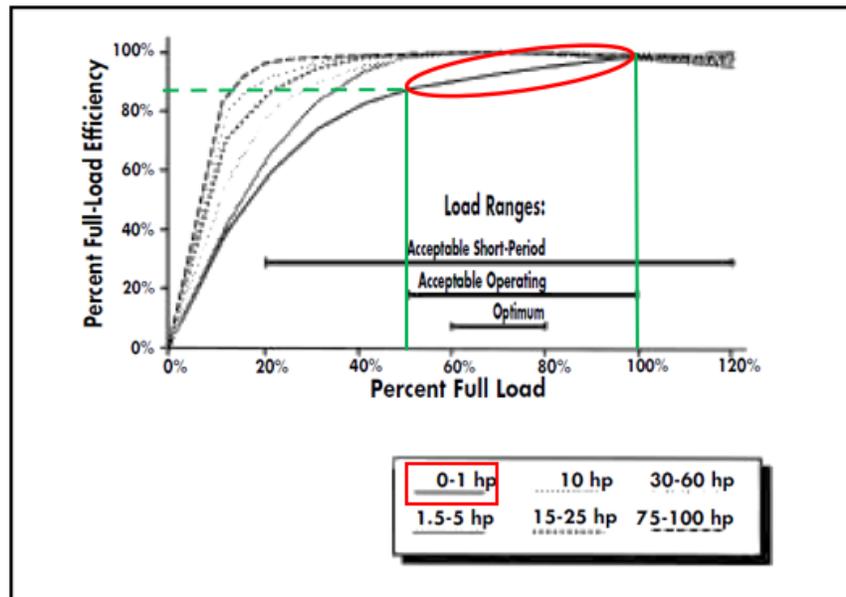
$H_t$  = potencia nominal ( $W$ )

La eficiencia de un motor eléctrico se puede estimar entre el 50% y el 100% y esta varía de acuerdo con la carga, mientras mayor sea la carga menor es la eficiencia, por lo tanto, si se considera que el motor va a tener una carga para una operación aceptable se puede seleccionar la eficiencia, la misma se ubicó en el valor del eje de ordenadas que coincida con la parte de la curva correspondiente al

motor de 0.25 Hp limitada por el rango del porcentaje de carga para operación aceptable como se indica en la figura 27.

**Figura 27**

*Carga parcial de motores (como función del % de eficiencia a plena carga)*



*Nota:* Imagen obtenida de: (Motor Challenge)

La curva para el motor disponible es la de 0-1 hp, se puede seleccionar alguna eficiencia que sea mayor al 50% para una operación aceptable, entonces se selecciona la del 85%.

$$\eta = 0.85$$

En cuanto a la eficiencia mecánica, se la debe determinar de acuerdo con el tipo de reductor que se utiliza, las principales características del reductor que son:

- Versión SRT
- Con un tornillo sin fin
- Relación de reducción de 80:1
- Brida # 40
- Velocidad nominal del motor trifásico de 1630 rpm

Para obtener la eficiencia se debe realizar una interpolación como se indica en la ecuación 3.9 para los valores límites del rango de la velocidad nominal del motor trifásico de 2800 rpm y 1400 rpm.

$$\frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (3.9)$$

Donde:

$$y_1 = 0.50; x_1 = 1400$$

$$y_2 = 0.54; x_2 = 2800$$

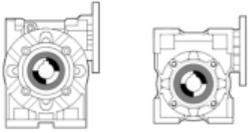
Dando una eficiencia de 0.5066:

$$y = \varepsilon \approx 0.51$$

**Tabla 11**

*Selección del reductor RS-RT 40 con  $i = 80$  para 2800 rpm*

**RS-RT - 2800 rpm**



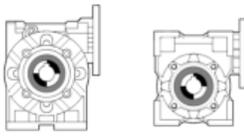
i =	5	7	10	15	20	28	40	49	56	70	80	100	
rpm	560	400	280	187	140	100	70	57	50	40	35	28	
RS - RT 28	kW	0.84	0.63	0.49	0.35	0.25	0.23	0.16	0.13	0.12	0.09	0.08	0.04
	Nm	13	13	14	14	13	15	14	13	12	11	10	7
	eff.	0.86	0.86	0.83	0.79	0.77	0.69	0.64	0.61	0.54	0.49	0.49	0.46
	$J_1 \times 10^{-6}$	6,2300	6,0100	5,5500	5,3000	5,2100	5,1600	5,1300	5,1200	5,1200	5,1100	5,1100	5,1100
RS - RT 40	kW	2.1	1.5	1.2	0.82	0.56	0.49	0.36	0.30	0.26	0.21	0.19	0.15
	Nm	32	31	34	34	30	34	32	31	30	29	28	26
	eff.	0.89	0.87	0.85	0.81	0.78	0.72	0.66	0.62	0.6	0.57	0.54	0.51
	$J_1 \times 10^{-5}$	2,2750	2,2130	2,0040	1,8920	1,8530	1,8280	1,8150	1,8110	1,8090	1,8060	1,8050	1,8040

*Nota.* Obtenida de: (VARVEL)

Tabla 12

Selección del reductor RS-RT 40 con  $i = 80$  para 1400 rpm

**RS-RT - 1400 rpm**



$i =$	5	7	10	15	20	28	40	49	56	70	80	100	
rpm	560	400	280	187	140	100	70	57	50	40	35	28	
RS - RT 28	kW	0,68	0,45	0,33	0,23	0,16	0,16	0,10	0,09	0,08	0,06	0,05	0,03
	Nm	20	18	18	18	16	20	17	17	15	12	12	8
	eff.	0.88	0.84	0.81	0.77	0.74	0.66	0.62	0.57	0.51	0.45	0.45	0.43
	$J_1 \times 10^{-5}$	6,2300	6,0100	5,5500	5,3000	5,2100	5,1600	5,1300	5,1200	5,1200	5,1100	5,1100	5,1100
RS - RT 40	kW	1.5	1.1	0.81	0,55	0,38	0,37	0,25	0,21	0,18	0,14	0,12	0,09
	Nm	45	45	46	44	39	48	42	41	38	36	32	29
	eff.	0.87	0.85	0.83	0.78	0.75	0.68	0.61	0.58	0.56	0.52	0.50	0.46
	$J_1 \times 10^{-5}$	2,2750	2,2130	2,0040	1,8920	1,8530	1,8280	1,8150	1,8110	1,8090	1,8060	1,8050	1,8040

*Nota.* En la tabla se selecciona la eficiencia del reductor en base a su relación de reducción igual a 80 y a la velocidad equivalente a 1400 rpm. Obtenida de: (VARVEL)

Por lo tanto, la potencia útil es:

$$H_u = 0.108 Hp = 80.815 W$$

Con la potencia útil ya se puede calcular el torque entregado por el motor, adicionalmente se conoce que la velocidad de salida del motorreductor es de 20.375 rpm, sin embargo, se requiere que esté en las unidades del Sistema Internacional (SI) utilizando la ecuación 3.10, por lo tanto:

$$\omega = 20.375 \text{ RPM}$$

$$\omega_o = \frac{2\pi}{60} \omega \quad (3.10)$$

Donde:

$\omega_o$  = velocidad angular del motor (rad/s)

$\omega$  = velocidad angular del motor (RPM)

$$\omega_o = 2.134 \text{ rad/s}$$

Con la velocidad y potencia útil ya se puede calcular el torque entregado por el motor que se calcula con la ecuación 3.11:

$$T = \frac{H_u}{\omega_o} \quad (3.11)$$

Donde:

$T$  = torque entregado por el motorreductor ( $Nm$ )

$H_u$  = potencia útil ( $W$ )

$\omega_o$  = velocidad angular del motor ( $rad/s$ )

$$T = 37.876 J$$

### **Dimensionamiento de elementos de protección del motor**

Debido al voltaje disponible en el laboratorio y la tensión de alimentación requerida por el motor en conexión delta se selecciona un variador de frecuencia de ½ hp de entrada monofásica y salida trifásica.

#### **Calibre del conductor**

Para definir el calibre del conductor es necesario calcular la corriente ( $I_n$ ) que consume el motor mediante la ecuación 3.12.

$$I_n = \frac{P_e}{\sqrt{3}V \cos(\varphi)} \quad (3.12)$$

Donde:

$I_n$  = corriente del motor ( $A$ )

$P_e$  = potencia eléctrica ( $W$ )

$V$  = voltaje de alimentación por fase ( $V$ )

$\cos(\varphi)$  = factor de potencia

Para ello, se calcula la potencia eléctrica ( $P_e$ ) a partir de la ecuación 3.13:

$$P_e = \frac{P_m}{n_m} \quad (3.13)$$

Donde:

$P_m$  = potencia mecánica ( $W$ )

$n_m$  = eficiencia del motor

$$P_e = 211.77 \text{ W}$$

$$I_n = 0.79 \text{ A} \approx 0.794 \text{ A}$$

Puesto que se empleó no solo el motor si no también un reductor se toma en cuenta su consumo. Para lo cual, a partir de la ecuación 3.14:

$$I_{rms} = 1.08(I_n) \left( \frac{1}{n_R} \right) \quad (3.14)$$

Donde:

$I_{rms}$  = corriente consumida ( $A$ )

$I_n$  = corriente del motor ( $A$ )

$n_R$  = eficiencia

Como resultado:

$$I_{rms} = 1.009 \text{ A}$$

Posteriormente se calcula la corriente de diseño ( $I_d$ ) con la ecuación 3.15 donde la corriente que consume el motor es un 25% debido al arranque del mismo:

$$I_d = 1.25 I_{rms} \quad (3.15)$$

Donde:

$I_d$  = corriente de diseño ( $A$ )

$I_{rms}$  = corriente consumida ( $A$ )

$$I_d = 1.261 \text{ A}$$

De modo que en base al catálogo del fabricante (Electrocable, 2018) como se muestra en la tabla 13 se elige un cable AWG 14 con aislamiento TW 60°C, 60 Hz cuya capacidad de corriente es la más baja que se dispone comercialmente con un valor de 15 A.

**Tabla 13**

*Características físicas y eléctricas conductores de cobre para 600 V. aislado con policloruro de vinilo (PVC) 60°C resistente a la humedad*

CONDUCTOR			Espesor de Aislamiento (mm)	Diámetro Externo Aprox. (mm)	Peso total Aprox. (kg / km)	*Capacidad de Corriente (A)
CALIBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	No. Hilos				
<b>FORMACIÓN SÓLIDO Y CABLEADO CONCÉNTRICO</b>						
14	2,08	1	0,76	3,15	26,30	15
12	3,31	1	0,76	3,57	38,62	20
10	5,261	1	0,76	4,11	57,72	30
8	8,367	1	1,14	5,54	95,99	40
8	8,367	7	1,14	5,98	101,89	40
6	13,3	7	1,52	7,70	164,63	55
4	21,15	7	1,52	8,92	245,90	70

*Nota.* En la tabla se selecciona el cable para realizar las conexiones del circuito de fuerza. Obtenida de:

(Electrocable, 2018)

### Guardamotor y relé térmico

Es necesario colocar un elemento que proteja al motor frente a cortocircuitos y a sobrecargas, por lo que se selecciona un guardamotor y un relé térmico basado en la corriente nominal. Sin embargo, debido a la potencia que el motor consume para vencer la resistencia al reposo se considera un factor de 1.6, por lo tanto:

$$I_p = 1.6(I_d)$$

$$I_p = 2.018 A$$

De acuerdo con los valores comerciales del catálogo de (ProDIN, 2019) se selecciona un guardamotor y un relé térmico de 2.5 a 4 A.

### Contactor

Como el motorreductor trifásico disponible es de tipo jaula de ardilla se elige un contactor tipo AC3 de 1.6 A.

### Análisis de la cinta transportadora

Concerniente al análisis de la cinta transportadora, es necesario comprobar que resista las tensiones que se generan debido al torque ejercido por el motorreductor. A continuación, se presentan los cálculos respectivos.

El peso específico por metro de la cinta está definido por la ecuación 3.16.

$$\psi = \gamma_o b t \quad (3.16)$$

Donde:

$\psi$  = peso específico ( $kg/m$ )

$\gamma_o$  = densidad específica ( $kg/m^3$ )

$b$  = ancho de la banda transportadora ( $m$ )

$t$  = espesor de la banda transportadora ( $m$ )

$$\psi = 1.555 \text{ kg/m}$$

La velocidad lineal de la banda se calculó utilizando los valores de la velocidad angular definida en la tabla 5 y el diámetro de los rodillos mediante la ecuación 3.17.

$$v = \omega \left( \frac{d}{2} \right) \quad (3.17)$$

Donde:

$\omega$  = Velocidad angular del rodillo motriz ( $rad/s$ )

$v$  = velocidad lineal de la banda transportadora ( $m/s$ )

$d$  = diámetro de los rodillos ( $m$ )

$$d = 4 \text{ pulg} = 101.6 \text{ mm}$$

$$v = 0.108 \text{ m/s}$$

El coeficiente de fricción entre los rodillos y la cinta se selecciona en base a las condiciones de trabajo que se presentan en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Valores del coeficiente de fricción entre los rodillos y la cinta según las condiciones de trabajo*

Superficie del tambor	Sin recubrimiento	Con recubrimiento
Alta adherencia	0.35	0.45
Seca	0.35	0.40
Húmeda	0.20	0.35
Mojada	0.10	0.30

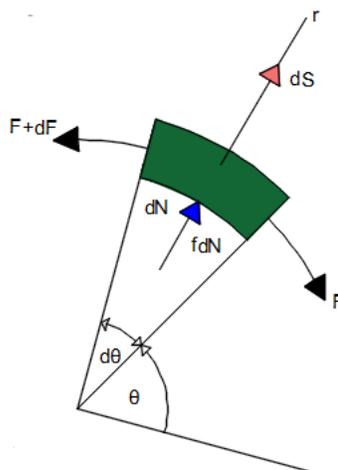
*Nota.* En la tabla se selecciona el coeficiente de fricción entre los rodillos y la cinta para una superficie seca del tambor. Obtenida de: (Rodríguez Galbarro, n.d.)

Se va a utilizar un rodillo seco sin recubrimiento, por lo cual el coeficiente de fricción es de 0.35.

$$f = 0.35$$

**Figura 28**

*Diagrama de cuerpo libre de un elemento infinitesimal en una cinta en contacto con un rodillo*



*Nota.* En la figura se representa el DCL de un elemento infinitesimal de una banda plana en contacto con una polea.

En la figura 28, se representa un elemento infinitesimal de una banda plana en contacto con una polea, se puede observar que se genera una fuerza centrífuga  $dS$ , la cual es causada por el movimiento y genera una tensión centrífuga en la cinta que se calcula con la ecuación 3.18.

$$F_c = \psi v^2 \quad (3.18)$$

Donde:

$F_c$  = tensión circunferencial (N)

$\psi$  = peso específico (kg/m)

$v$  = velocidad lineal de la banda transportadora (m/s)

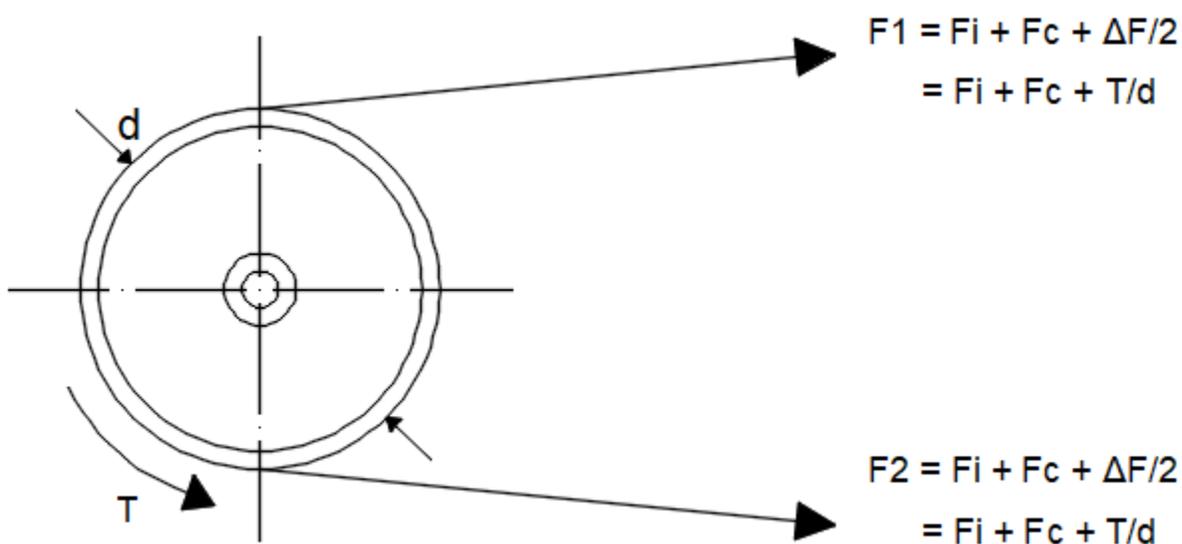
Dando como resultado

$$F_c = 0.018 \text{ N}$$

La tensión circunferencial generada es muy pequeña por lo que se la puede despreciar en el resto del cálculo.

### Figura 29

Fuerzas y pares de torsión sobre un rodillo



*Nota.* En la figura se representa el par de torsión, donde:  $F_1$  y  $F_2$  resultan de la sumatoria de la fuerza inicial ( $F_i$ ), fuerza de tensión circunferencial y la fuerza del par de torsión.

En la figura 29 se presenta el par de torsión aplicado sobre el rodillo motriz, la tensión del lado ajustado  $F_1$  y la tensión del lado holgado  $F_2$ , la diferencia entre estas dos se conoce como la tensión neta que se obtiene con la ecuación 3.19.

$$F_n = F_1 - F_2 = \frac{H_u}{v} \quad (3.19)$$

Donde:

$F_n$  = tensión neta ( $N$ )

$F_1$  = tensión del lado ajustado ( $N$ )

$F_2$  = tensión del lado holgado ( $N$ )

$H_u$  = potencia útil ( $W$ )

$v$  = velocidad de la cinta ( $m/s$ )

También se utilizó la ecuación 3.20 que toma en cuenta la fuerza circunferencial y el término  $e^{f\varphi}$  correspondiente con la configuración geométrica de la banda.

$$F_1 - F_2 = (F_1 - F_c) \frac{e^{f\varphi} - 1}{e^{f\varphi}} \quad (3.20)$$

Donde:

$F_1$  = tensión del lado ajustado ( $N$ )

$F_2$  = tensión del lado holgado ( $N$ )

$F_c$  = tensión circunferencial ( $N$ )

$f$  = coeficiente de rozamiento entre la banda y el rodillo

$\varphi$  = ángulo de contacto ( $rad$ )

Como se mencionó anteriormente la fuerza circunferencial es despreciable, entonces la forma reducida de la ecuación 3.21 queda de la siguiente manera:

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{f\varphi} \quad (3.21)$$

Donde:

$F_1$  = tensión del lado ajustado ( $N$ )

$F_2$  = tensión del lado holgado ( $N$ )

$f$  = coeficiente de rozamiento entre la banda y el rodillo

$\varphi$  = ángulo de contacto ( $rad$ )

La ecuación 3.21 también se la conoce como la de Euler-Eytelwein.

Entonces se tiene el sistema de dos ecuaciones:

$$\begin{cases} F_1 - F_2 = \frac{H_u}{v} \\ \frac{F_1}{F_2} = e^{f\varphi} \end{cases}$$

Tras sustituir los valores de los parámetros conocidos se pueden calcular las incógnitas  $F_1$  y  $F_2$  dando como resultado:

$$F_1 = 1118 \text{ N}$$

$$F_2 = 327.27 \text{ N}$$

La tensión inicial de la cinta se calcula con la ecuación 3.22.

$$F_i = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c \quad (3.22)$$

Donde:

$F_i$  = tensión inicial ( $N$ )

$F_1$  = tensión del lado ajustado ( $N$ )

$F_2$  = tensión del lado holgado ( $N$ )

$F_c$  = tensión circunferencial ( $N$ )

$$F_i = 745.117 \text{ N}$$

Con estos valores ya se puede obtener la tensión neta que es:

$$F_n = 745.73 \text{ N}$$

La tensión unitaria es la máxima a la que se someterá la banda y se calcula con la siguiente ecuación 3.23:

$$F_u = \frac{F_1}{b} \quad (3.23)$$

Donde:

$F_u$  = tensión unitaria ( $N/m$ )

$F_1$  = tensión del lado ajustado ( $N$ )

$b$  = ancho de la cinta ( $m$ )

$$F_u = \frac{1118N}{0.37m}$$

$$F_u = 3022 N/m$$

De acuerdo con un fabricante de cintas, la tensión permitida para la de PVC sintético está entre 120 kN/m y 80 kN/m, por motivos prácticos se escoge la menor. De esta manera se calcula el factor de seguridad para la cinta con la ecuación 3.24:

$$F_r = 80000 N/m$$

$$\eta_s = \frac{F_r}{F_u} \quad (3.24)$$

Donde:

$\eta_s$  = factor de seguridad de la cinta

$F_r$  = tensión permitida del PVC sintético ( $N/m$ )

$F_u$  = tensión unitaria ( $N/m$ )

$$\eta_s = 26.476$$

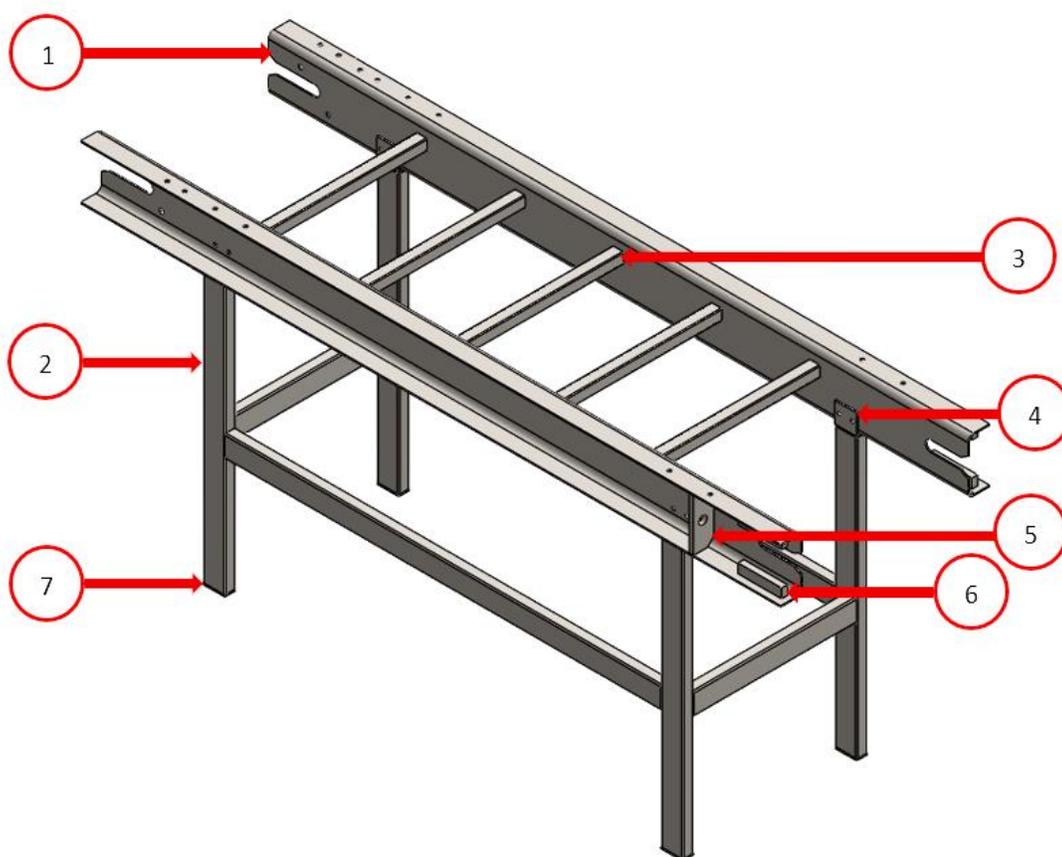
Se obtiene un factor de seguridad elevado, por lo cual, la banda no llegará a la tensión de rotura con el torque entregado por el motorreductor.

### ***Diseño de la estructura***

La estructura de la banda transportadora se diseñó utilizando elementos comerciales como se indican en la figura 30 y tabla 15. La estructura cumple con los requisitos de altura, longitud, acondicionamiento/facilidad de montaje para el mecanismo de tensado, además de la capacidad de soportar las cargas estáticas que se generen.

**Figura 30**

*Estructura del subsistema de transporte*



*Nota.* En la figura se muestra la estructura del subsistema de transporte compuesto por perfiles estructurales de A36.

**Tabla 15***Componentes de la estructura del subsistema de transporte*

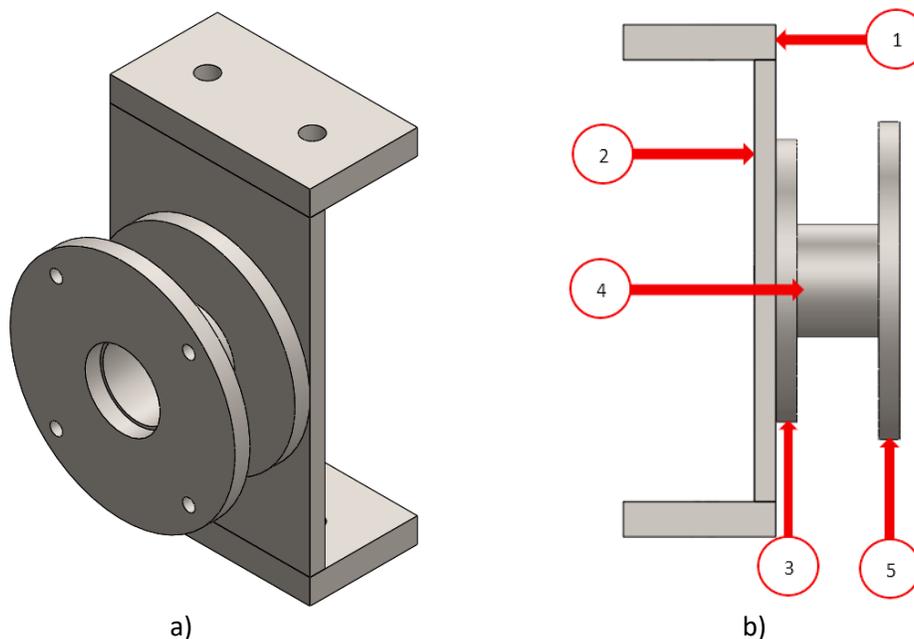
No.	Descripción	No.	Descripción
1	Perfil tipo U de ASTM A36 de 125x50x3 mm	5	Placa de 10 mm de espesor
2	Tubo rectangular de ASTM A36 de 2x1 pulgadas y 1.8 mm de espesor	6	Varilla cuadrada de ASTM A36 de 24.5x24.5
3	Tubo cuadrado de ASTM A36 de 1x1 pulgada	7	Platina de 4 mm de espesor
4	Ángulo de 50x50mm con 1/8 de pulgada de espesor		

*Nota.* En la tabla se describen los perfiles estructurales que constituyen el bastidor de la banda transportadora.

También se diseñó un soporte para el motorreductor el cual es desmontable y se une con pernos M8 a la estructura del subsistema de transporte. El soporte se construyó con platinas de 3mm de espesor como se indica en la figura 31 y en la tabla 16, las platinas que tienen los contornos redondos funcionan como uniones de brida para unirse con pernos con el motorreductor. De esta forma se protege la flecha del motorreductor y se otorga seguridad frente a riesgos para el operario.

**Figura 31**

a) Vista isométrica del soporte para el motorreductor, b) Vista lateral del soporte para el motorreductor



*Nota.* En la figura se muestra el soporte elaborado a partir de placas de ASTM A36 de 3mm de espesor.

**Tabla 16**

*Componentes del soporte del motorreductor*

No.	Descripción	No.	Descripción
1	Platina de 10 mm de espesor	4	Tubo de 1.25 pulgadas x 2 mm de espesor
2	Platina de 6 mm de espesor	5	Platina de 6 mm de espesor
3	Platina de 6 mm de espesor		

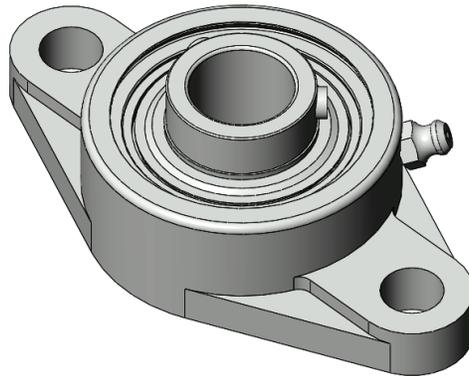
*Nota.* En la tabla se detallan los perfiles estructurales empleados para el diseño del soporte del motorreductor.

Para el montaje del rodillo motriz se reutilizaron dos chumaceras de pared de 19 mm o  $\frac{3}{4}$  de pulgada de un proyecto anterior. Su código es el UCFL 204 y su modelo CAD se indica en la figura 32, de acuerdo con las características proporcionadas por un proveedor la chumacera es adecuada para

aplicaciones en las que se tiene un sentido de giro constante y su rodamiento de bolas no admite desplazamiento axial, por lo cual es ideal para el proyecto.

**Figura 32**

*Chumacera UCFL 204*

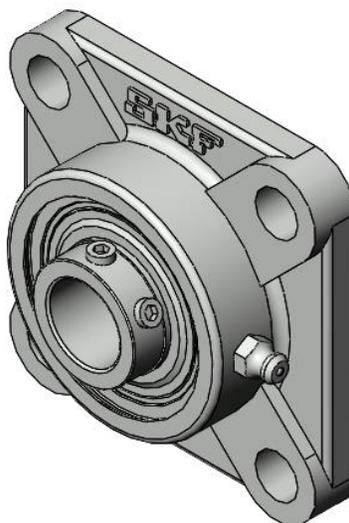


*Nota.* Modelo CAD obtenido de: (SKF A. , 2023)

Para seleccionar la chumacera del mecanismo de tensado, se optó por una chumacera de pared de código UCF 204-12 de un diámetro interior de 19 mm o 3/4 de pulgada como se representa en el CAD de la figura 33. La chumacera de pared va a ser empujada por el perno tensor a lo largo de dos rieles que constituyen el tensor fijo como se indica en la figura 34 y en la tabla 17.

**Figura 33**

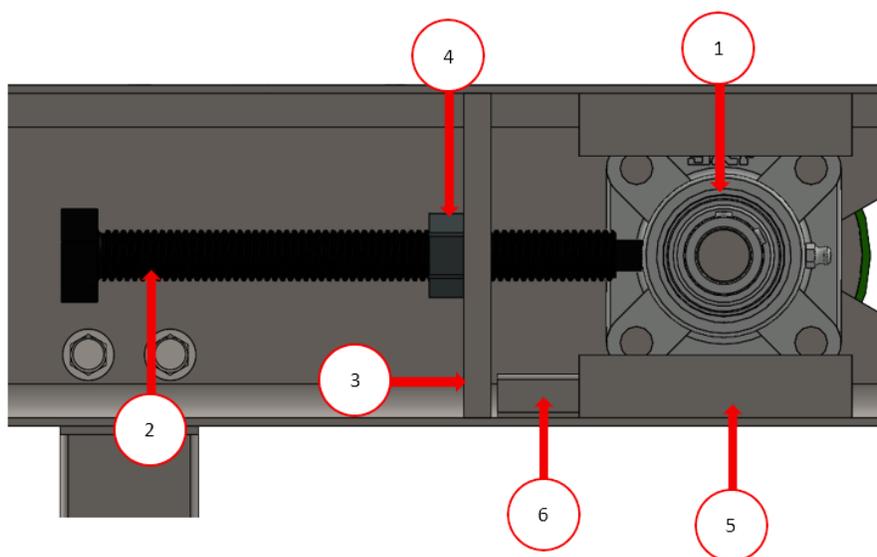
*Chumacera tensora UFC 204-12*



*Nota.* Modelo CAD obtenido de: (SKF, 2023).

**Figura 34**

*Mecanismo de tensado*



*Nota.* En la figura se muestra la disposición de los componentes que constituyen el mecanismo de tensado.

**Tabla 17**

*Componentes del mecanismo de tensado*

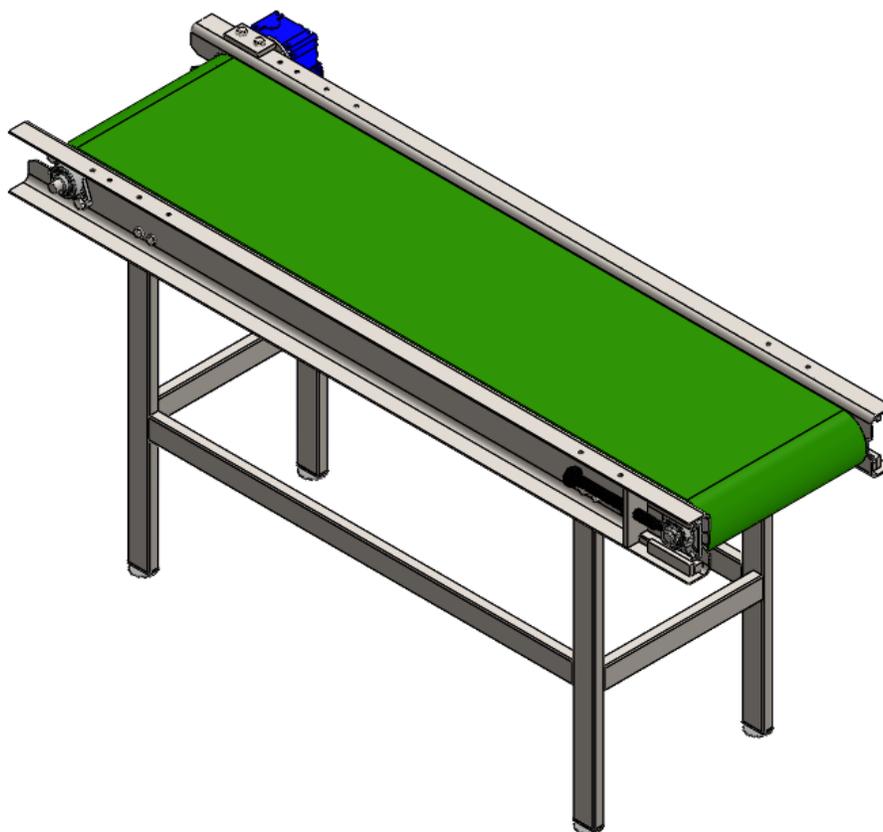
No.	Descripción	No.	Descripción
1	Chumacera tensora UCF 204-12	4	Tuerca
2	Perno tensor	5	Riel para la chumacera
3	Soporte para el perno tensor	6	Varilla para la chumacera

*Nota.* En la tabla se enlistan los componentes enumerados en la figura 34.

De esta manera el subsistema de transporte queda como se indica en la figura 35.

**Figura 35**

*CAD del subsistema de transporte*



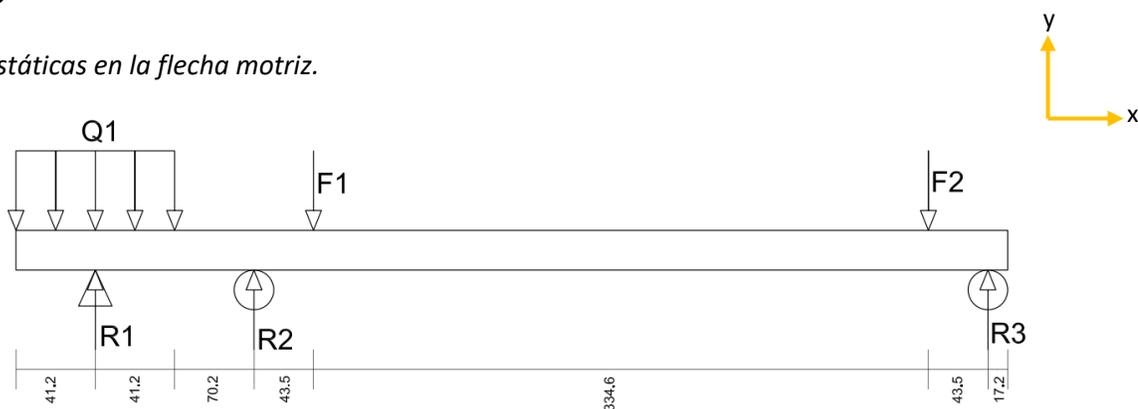
*Nota.* En la figura se muestra el diseño final a implementarse del subsistema de transporte.

### Análisis de la flecha

La flecha motriz es un elemento que va a estar sometido a una importante carga estática y dinámica, por lo que es importante en su análisis calcular sus respectivos factores de seguridad para comprobar si resiste. El análisis se inicia representando las cargas estáticas, reacciones y sus distancias como se indica en la figura 36, cuyos parámetros son:  $Q_1$  es el peso del motorreductor representado a manera de una carga distribuida a lo largo de la sección donde entra el eje, los parámetros  $F_1$  y  $F_2$  son dos cargas puntuales que sumadas son iguales al peso del rodillo motriz. La parte donde se produce la reacción del motorreductor se ha representado como un apoyo de fijo en la mitad de la sección donde entra el eje y los cojinetes/chumaceras se han representado como apoyos de rodillo, en todos los apoyos solo hay cargas radiales.

**Figura 36**

*Cargas estáticas en la flecha motriz.*



*Nota.* En la figura se muestra el DCL de la flecha del rodillo motriz.

De acuerdo con la figura 36, la flecha es una viga indeterminada porque el número de incógnitas (reacciones) es mayor que el número de ecuaciones ( $\sum F_y$  y  $\sum M$ ), por lo que el problema se debe resolver aplicando el método de la doble integración.

El motorreductor y el rodillo motriz tienen las siguientes masas:

$$m_{mot} = 6.6 \text{ kg}$$

$$m_{rod} = 2.5 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la carga distribuida del motorreductor es:

$$Q_1 = \frac{m_{mot}g}{(0.0824)}$$

$$Q_1 = 785.7524 \text{ N/m}$$

El peso total del motorreductor es  $q_1$ :

$$q_1 = Q_1(0.0824) = 64.746 \text{ N}$$

Y las cargas que representan el peso del rodillo son:

$$F1 = \frac{m_{rod}g}{2}$$

$$F1 = F2 = 12.2625 \text{ N}$$

La sumatoria de fuerzas en el eje y es:

$$\sum Fy = 0$$

Con lo que se obtiene la primera ecuación del sistema:

$$(1) R_1 + R_2 + R_3 = 89.271$$

La sumatoria de momentos respecto al apoyo de  $R_2$  es:

$$\sum M_{R_2} = 0$$

$$-R_1(0.1114) + q_1(0.1114) - F_1(0.0435) - F_2(0.3781) + R_3(0.4216) = 0$$

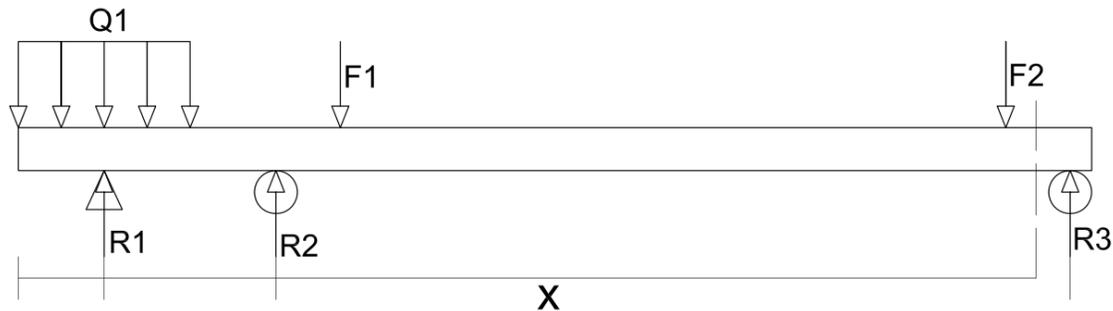
Sustituyendo los valores de los parámetros se obtiene la segunda ecuación del sistema:

$$(2) -0.1114R_1 + 0.4216R_3 = -2.0428$$

La ecuación de diferencial de la curva elástica se la obtiene a partir de la sumatoria de momentos respecto al final del tramo que indica la figura 37.

Figura 37

Cargas para el método de la doble integración



Nota. En la figura se determina la distancia "x" a partir de la cual se determinará la fuerza cortante y el momento flector.

Ecuación diferencial de la curva elástica:

$$EI \frac{d^2\delta}{dx^2} M = -q_1(x - 0.0412) + R_1(x - 0.0412) + R_2(x - 0.1526) - F_1(x - 0.1961) - F_2(x - 0.5307)$$

Se procede a obtener las derivadas de la ecuación anterior.

Primera derivada:

$$EI \frac{d\delta}{dx} = EI\theta = -\frac{q_1}{2}(x - 0.0412)^2 - \frac{R_1}{2}(x - 0.0412)^2 + \frac{R_2}{2}(x - 0.1526)^2 - \frac{F_1}{2}(x - 0.1961)^2 - \frac{F_2}{2}(x - 0.5307)^2 + C_1$$

Segunda derivada:

$$EI\delta = -\frac{q_1}{6}(x - 0.0412)^3 - \frac{R_1}{6}(x - 0.0412)^3 + \frac{R_2}{6}(x - 0.1526)^3 - \frac{F_1}{6}(x - 0.1961)^3 - \frac{F_2}{6}(x - 0.5307)^3 + C_1x + C_2$$

Se procede a obtener las condiciones de frontera, allí se indica que no se va a producir deflexión en ningún punto del eje y, por lo tanto, no va a existir desplazamiento vertical y la pendiente va a ser cero.

Primera condición de frontera (el desplazamiento vertical en el apoyo 1 es 0):

$$x = 0.0412, \quad \delta = 0, \quad EI\delta = 0$$

$$0.0412C_1 + C_2 + 6.1945 \times 10^{-4}F_1 + 0.0195F_2 - 2.3041 \times 10^{-4}R_2 = 0$$

Segunda condición de frontera (la pendiente en el apoyo 1 es 0):

$$x = 0.0412, \quad \theta = 0, \quad EI\theta = 0$$

$$C_1 - 0.012F_1 - 0.1198F_2 + 0.0062R_2 = 0$$

Tercera condición de frontera (el desplazamiento vertical en el apoyo 2 es 0):

$$x = 0.1526, \quad \delta = 0, \quad EI\delta = 0$$

$$7.3074 \times 10^{-4}F_1 + 0.0028F_2 + 2.3041 \times 10^{-4}R_1 - 4.6082 \times 10^{-4}R_2 - 2.3041 \times 10^{-4}q_1 = 0$$

Para obtener la tercera ecuación del sistema se debe sustituir las constantes  $C_1$  y  $C_2$ , en la ecuación de la tercera condición de frontera:

$$(3) \quad 2.3041 \times 10^{-4}R_1 - 4.6082 \times 10^{-4}R_2 = -0.0285$$

El sistema de ecuaciones queda:

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & Ind \\ 1 & 1 & 1 & 89.271 \\ -0.1114 & 0 & 0.4216 & -2.0428 \\ 2.3041 \times 10^{-4} & -4.6082 \times 10^{-4} & 0 & -0.0285 \end{bmatrix}$$

Tras resolver el sistema de ecuaciones anterior se obtienen los siguientes valores de las reacciones:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18.3378 \text{ N} \\ 70.9332 \text{ N} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para resumir, con las reacciones se pudieron obtener las ecuaciones de fuerza cortante y momento flector para cada tramo:

### **Sección 1 ( $0 \leq x \leq 0.0412$ )**

$$V(x) = -Q_1x$$

$$M(x) = -Q_1 \frac{x^2}{2}$$

**Sección 2 ( 0.0412 ≤ x ≤ 0.0824 )**

$$V(x) = Q_1x + R_1$$

$$M(x) = R_1(x - 0.0412) - Q_1 \frac{x^2}{2}$$

**Sección 3 (0.0824 ≤ x ≤ 0.1526)**

$$V(x) = R_1 - q_1$$

$$M(x) = R_1(x - 0.0412) - q_1(x - 0.0412)$$

**Sección 4 (0.1526 ≤ x ≤ 0.1961)**

$$V(x) = R_1 + R_2 - q_1$$

$$M(x) = R_1(x - 0.0412) + R_2(x - 0.1526) - q_1(x - 0.0412)$$

**Sección 5 (0.1961 ≤ x ≤ 0.5307)**

$$V(x) = R_1 + R_2 - q_1 - F_1$$

$$M(x) = R_1(x - 0.0412) + R_2(x - 0.1526) - q_1(x - 0.0412) - F_1(x - 0.1961)$$

**Sección 6 (0.5307 ≤ x ≤ 0.5742)**

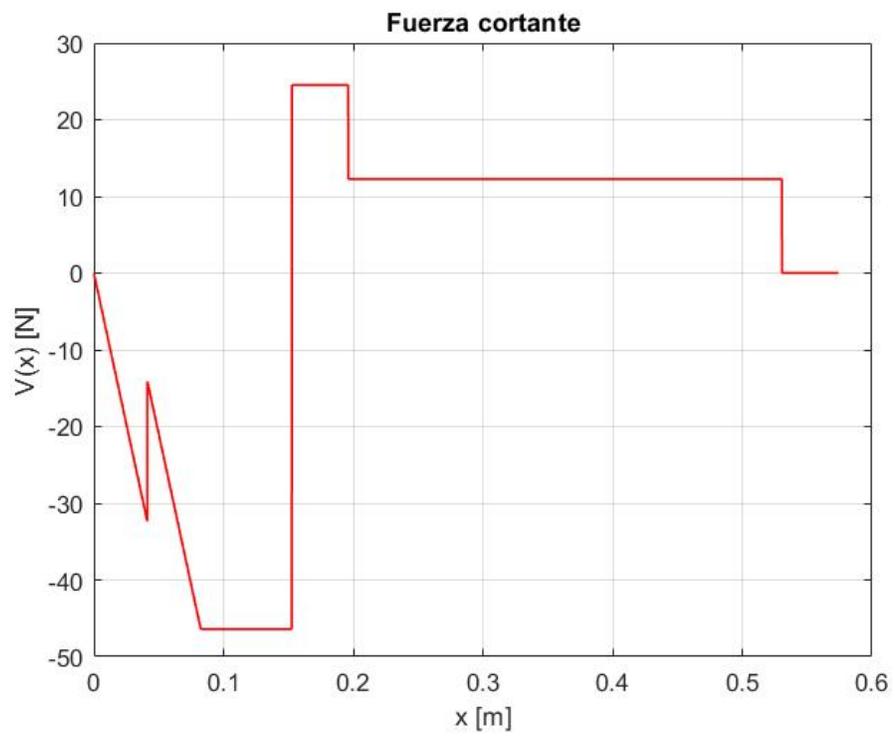
$$V(x) = R_1 + R_2 - q_1 - F_1 - F_2$$

$$M(x) = R_1(x - 0.0412) + R_2(x - 0.1526) - q_1(x - 0.0412) - F_1(x - 0.1961) - F_2(x - 0.5307)$$

Con las funciones por partes  $V(x)$  y  $M(x)$ , se pueden graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flector como se indican en la figura 38 y figura 39 respectivamente.

**Figura 38**

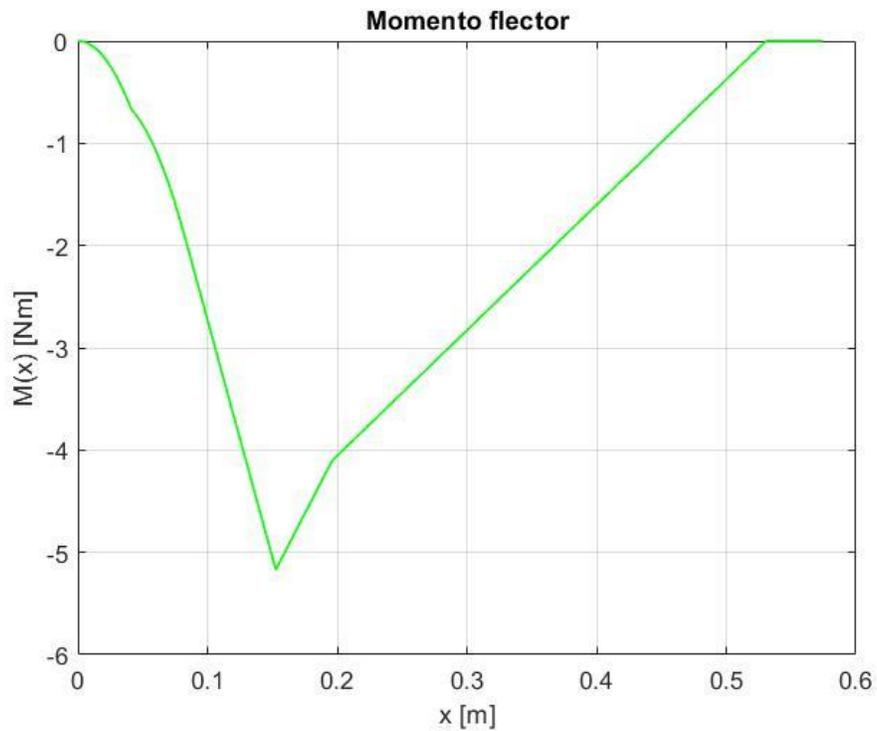
Diagrama de la fuerza cortante del eje motriz



*Nota.* En la figura se muestra la fuerza cortante resultante.

Figura 39

Diagrama de momento flector



*Nota.* En la figura se muestra el diagrama de momento flector, a partir del cual se determina el momento flector máximo igual a 5.1 Nm.

La flecha se fabricó de acero **AISI 1035** cuyos valores de resistencia última a la tracción y límite de fluencia son:

$$S_{ut} = 585 \text{ MPa}$$

$$S_y = 370 \text{ MPa}$$

No se requirió de un hombro en el eje, por lo tanto, el factor del momento de torsión es igual a 1.

$$K_{ts} = 1$$

Además, el diámetro mayor  $D$  y el diámetro del cojinete  $d$ , son los mismos, entonces la relación

$\frac{D}{d} = 1$ , de esta manera el factor del momento flector es igual a 1.

$$K_t = 1$$

El factor de concentración de esfuerzo para carga axial/flectora y el factor de concentración de esfuerzos para carga torsional, se calculan con las ecuaciones 3.25 y 3.26 respectivamente.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (3.25)$$

Donde:

$K_f$  = factor de concentración de esfuerzos flectores

$K_t$  = factor del momento flector

$$K_{fs} = 1 + q(K_{ts} - 1) \quad (3.26)$$

Donde:

$K_{fs}$  = factor de concentración de esfuerzos de torsión

$K_{ts}$  = factor del momento de torsión

Debido a la ausencia de un hombro, no existe muesca alguna entonces los valores de los factores de concentración de esfuerzos son iguales a 1.

$$K_f = 1$$

$$K_{fs} = 1$$

A continuación, se procedió a calcular el límite de la resistencia a la fatiga donde se utiliza la ecuación 3.27.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (3.27)$$

Donde:

$S_e$  = límite de la resistencia a la fatiga (MPa)

$k_a$  = factor de modificación por la condición superficial

$k_b$  = factor de modificación por tamaño

$k_c$  = factor de modificación por la carga

$k_d$  = factor de modificación por temperatura

$k_e$  = factor de confiabilidad

$S'_e$  = factor del límite a la fatiga para viga rotatoria (MPa)

El factor de modificación por la condición superficial  $k_a$  se calcula con la ecuación 3.28 y los valores de a y b se eligen de acuerdo con la tabla 18.

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (3.28)$$

Donde:

$k_a$  = factor de modificación por la condición superficial

$a$  = factor

$b$  = exponente

$S_{ut}$  = resistencia última a la tracción (MPa)

**Tabla 18**

*Parámetros en el factor de la condición superficial*

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	$S_{ut}$ , kpsi	$S_{ut}$ , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.0	-0.995

*Nota.* Obtenida de: (Budynas & Nisbett, 2012).

Para el acero AISI 1035, se debe escoger los valores de la fila de maquinado o laminado en frío.

$$a = 4.51, \quad b = -0.265$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.28. se obtiene:

$$k_a = 0.833$$

El factor de modificación por tamaño  $k_b$  se calcula con la función por partes que se indica a continuación:

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{0.3}\right)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

El diámetro del eje es de 19mm, por lo que se elige la parte de la función correspondiente y se puede calcular el valor de  $k_b$ .

$$k_b = 0.905$$

El factor de modificación por la carga  $k_c$  se elige basado en el tipo de carga que se tiene, el eje está principalmente sometido a una carga de torsión.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases}$$

$$k_c = 0.59$$

El factor de modificación por temperatura  $k_d$  se calcula con la ecuación 3.29.

$$k_d = 0.975 + 0.432 \times 10^{-3}T_f - 0.115 \times 10^{-5}T_f^2 + 0.104 \times 10^{-8}T_f^3 - 0.595 \times 10T_f^4 \quad (\text{K-3.29})$$

Donde:

$k_d$  = factor de modificación por temperatura

$T_f$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}F$ )

El eje va a trabajar a temperatura ambiente.

$$T_f = 20 \text{ }^{\circ}C = 68 \text{ }^{\circ}F$$

Sustituyendo el valor de  $T_f$  en la ecuación 3.29 se obtiene:

$$k_d = 0.999 \approx 1$$

Para el cálculo del factor de confiabilidad  $k_e$ , se utiliza la tabla 19.

**Tabla 19**

*Factor de confiabilidad correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga*

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

*Nota.* En la tabla se selecciona el factor de confiabilidad de acuerdo con la confiabilidad que se quiere para banda transportadora, es decir equivalente al 95%. Obtenida de: (Budynas & Nisbett, 2012).

Se establece una confiabilidad del 95%, por lo que el factor  $k_e$  es el siguiente:

$$k_e = 0.868$$

Por último, el factor de modificación por efectos varios  $k_f$  se establece por defecto como 1 porque no se tienen datos adicionales para el caso.

$$k_f = 1$$

Se debe seleccionar el factor del límite a la fatiga para viga rotatoria de acuerdo con la siguiente función:

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

Entonces de acuerdo con el valor de la resistencia última ( $S_{ut} = 585 \text{ MPa}$ ) se utilizó la expresión  $S'_e = 0.5S_{ut}$ .

$$S'_e = 2.925 \times 10^8 \text{ Pa} = 292.5 \text{ MPa}$$

Con todos los valores calculados anteriormente ya se puede calcular el límite de resistencia a la fatiga con la ecuación 3.27.

$$S_e = 1.129 \times 10^8 \text{ Pa} = 112.9 \text{ MPa}$$

El valor del momento flector medio se puede obtener con el diagrama de momento flector de la figura 39, la sección crítica se da en el cojinete/chumacera donde el valor del momento flector es igual a  $-5.17 \text{ Nm}$ .

$$M_m = -5.17 \text{ Nm}$$

Respecto al valor del par de torsión medio, es igual al par de salida  $T$  del motorreductor que se indicó en la sección de cálculos del motor.

$$T_m = T = 37.876 \text{ Nm}$$

Los momentos flectores y par de torsión se asumen iguales a cero porque no se disponen de mediciones para construir las gráficas  $\sigma(t)$  y  $\tau(t)$  y definir las relaciones de esfuerzos.

$$M_a = 0$$

$$T_a = 0$$

También se asume que las fuerzas axiales son iguales a cero ya que los rodamientos de los cojinetes/chumaceras son de bolas.

$$(F_a)_{axial} = 0$$

$$(F_m)_{axial} = 0$$

Los esfuerzos cortantes por torsión, por axial y por flexión se calculan con las ecuaciones 3.28, 3.29 y 3.30 respectivamente.

$$\tau_{torsión} = \frac{T}{\frac{\pi d^3}{16}} \quad (3.28)$$

$$\sigma_{axial} = \frac{F_{axial}}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (3.29)$$

$$\sigma_{flexión} = \frac{M}{\frac{\pi d^3}{32}} \quad (3.30)$$

Donde:

$\tau_{torsión}$  = Esfuerzo cortante por torsión (MPa)

$\sigma_{axial}$  = Esfuerzo axial (MPa)

$\sigma_{flexión}$  = Esfuerzo por flexión (MPa)

$T$  = par de salida del motorreductor (Nm)

$d$  = diámetro del eje (m)

$F_{axial}$  = Fuerza axial (N)

$M$  = Momento flector (Nm)

Donde se obtienen los siguientes valores:

$$(\tau_m)_{torsión} = 2.812 \times 10^7 Pa = 28.12 MPa$$

$$(\tau_a)_{torsión} = 0$$

$$(\sigma_m)_{axial} = 0$$

$$(\sigma_a)_{axial} = 0$$

$$(\sigma_m)_{flexión} = -7.678 \times 10^6 Pa = -7.678 MPa$$

$$(\sigma_a)_{flexión} = 0$$

Los esfuerzos medios y alternantes se calculan con las ecuaciones 3.31 y 3.32 respectivamente.

$$\sigma'_m = \sqrt{(K_f(\sigma_m)_{flexión} + K_f(\sigma_m)_{axial})^2 + 3(K_{fs}(\tau_m)_{torsión})^2} \quad (3.31)$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\left(K_f(\sigma_a)_{flexión} + K_f \frac{(\sigma_a)_{axial}}{0.85}\right)^2 + 3(K_{fs}(\tau_a)_{torsión})^2} \quad (3.32)$$

Donde:

$\sigma'_m$  = esfuerzo medio (MPa)

$\sigma'_a$  = esfuerzo alternante (MPa)

$K_f$  = factor de concentración de esfuerzos flectores

$K_{fs}$  = factor de concentración de esfuerzos de torsión

El esfuerzo medio que se obtiene es:

$$\sigma'_m = 4.931 \times 10^7 Pa = 49.31 MPa$$

Mientras que el esfuerzo alternante es cero:

$$\sigma'_a = 0$$

El factor de seguridad para fallas a fatiga se obtiene con el criterio de Goodman modificado que se indica en la ecuación 3.33.

$$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} = \frac{1}{\eta_f} \quad (3.33)$$

Donde:

$\sigma'_a$  = esfuerzo alternante (MPa)

$\sigma'_m$  = esfuerzo medio (MPa)

$S_e$  = límite de la resistencia a la fatiga (MPa)

$S_{ut}$  = resistencia última a la tracción (MPa)

$\eta_f$  = factor de seguridad para fallas a fatiga

Se sustituyen los valores de los parámetros correspondientes en la ecuación 3.33 y el factor de seguridad que se obtiene es:

$$\eta_f = 11.863$$

Los esfuerzos máximos se calculan con las ecuaciones 3.34 y 3.35.

$$\sigma_{max} = K_f(\sigma_a)_{flexión} + K_f \frac{(\sigma_a)_{axial}}{0.85} + (K_f(\sigma_m)_{flexión} + K_f(\sigma_m)_{axial}) \quad (3.34)$$

$$\tau_{max} = K_{fs}(\tau_a)_{torsión} + K_{fs}(\tau_m)_{torsión} \quad (3.35)$$

Donde:

$\sigma_{max}$  = esfuerzo por flexión máximo (MPa)

$\tau_{max}$  = esfuerzo por torsión máximo (MPa)

$K_f$  = factor de concentración de esfuerzos flectores

$K_{fs}$  = factor de concentración de esfuerzos de torsión

$\tau_{torsión}$  = Esfuerzo cortante por torsión (MPa)

$\sigma_{axial}$  = Esfuerzo axial (MPa)

$\sigma_{flexión}$  = Esfuerzo por flexión (MPa)

Los valores que se obtienen son los siguientes, que vienen a ser los mismos que  $(\tau_m)_{torsión}$  y  $(\sigma_m)_{flexión}$  ya que son los únicos presentes.

$$\sigma_{max} = -7.678 \times 10^6 Pa = -7.678 MPa$$

$$\tau_{max} = 2.812 \times 10^7 Pa = 28.12 MPa$$

Conociendo estos valores se puede calcular el esfuerzo de Von Mises que se obtiene con la ecuación 3.36.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2} \quad (3.36)$$

Donde:

$\sigma'$  = esfuerzo de Von Mises (MPa)

$\sigma_{max}$  = esfuerzo por flexión máximo (MPa)

$\tau_{max}$  = esfuerzo por torsión máximo (MPa)

$$\sigma' = 4.931 \times 10^7 Pa = 49.31 MPa$$

Finalmente se calcula el factor de seguridad para fallas estáticas comparando el esfuerzo de Von Mises con la resistencia a la fluencia utilizando la ecuación 3.37.

$$\eta_s = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (3.37)$$

Donde:

$\eta_s$  = factor de seguridad para fallas estáticas

$S_y$  =  $\sigma_y$  límite de fluencia (MPa)

$\sigma'$  = esfuerzo de Von Mises (MPa)

$$\eta_s = 7.503$$

De esta manera se concluye que el factor de seguridad  $\eta_f$  del criterio de Goodman modificado indica que la flecha no va a fallar por fatiga (esfuerzo fluctuante), por otra parte, el factor de seguridad  $\eta_s$  para la carga estática indica que tampoco va a fallar de esa manera.

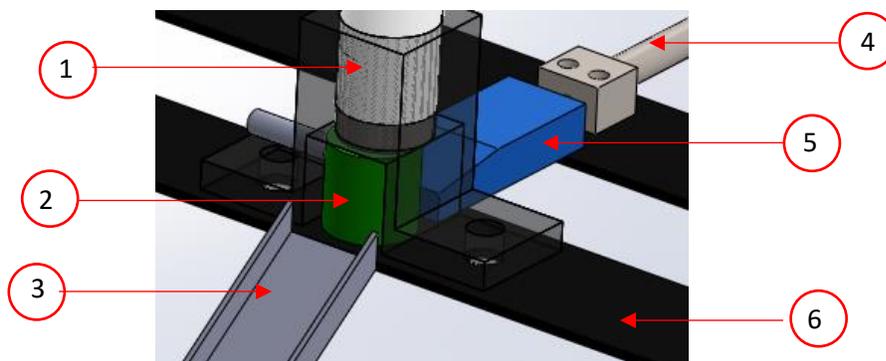
### **Diseño del subsistema dosificador**

Para diseñar el subsistema dosificador se partió de la disposición del contenedor y de la fuerza necesaria para poner en movimiento a la probeta. Se consideraron dos mecanismos:

#### ***Selección del mecanismo de dosificación***

**Opción A:** por efecto de la gravedad

En la figura 40 se presenta un contenedor capaz de almacenar 5 probetas que por efecto de la gravedad caerán sobre una base y se apilarán uno sobre otro para que un dado acoplado al vástago de un cilindro neumático empuje la probeta por una rampa. En la tabla 20, se detallan los componentes de la opción A.

**Figura 40***Bosquejo de la opción A*

*Nota.* En la figura se muestra el modelo CAD de la opción A del mecanismo para dosificar.

**Tabla 20***Componentes de la opción A*

No.	Descripción	No.	Descripción
1	Contenedor	4	Cilindro neumático
2	Probeta	5	Dado
3	Rampa	6	Base

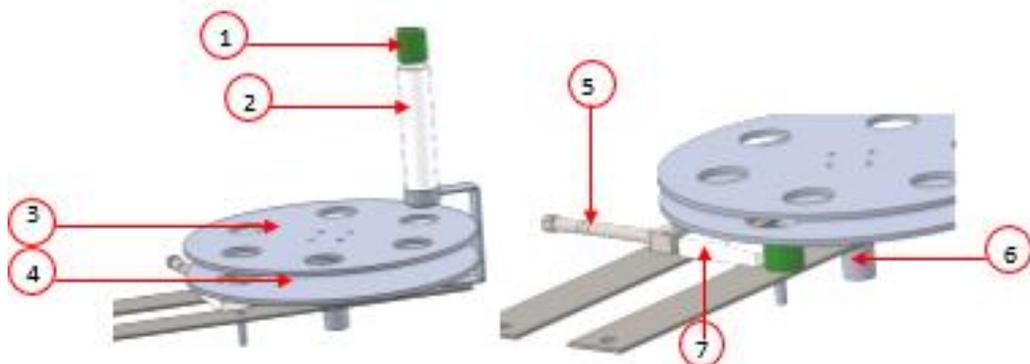
*Nota.* En la tabla se enlista los componentes de la opción A de la figura 40.

**Opción B: por discos**

En la figura 41 se dispone de un contenedor con capacidad de 5 probetas distribuidas gracias al movimiento de un disco con 6 agujeros que al sincronizarse con un disco fijo ubicará la probeta sobre una base para que un cilindro neumático la empuje y coloque sobre la banda transportadora. En la tabla 21, se describen sus componentes.

**Figura 41**

*Bosquejo de la opción B*



*Nota.* En la figura se muestra el modelo CAD de la opción B del mecanismo para dosificar.

**Tabla 21**

*Componentes de la opción B*

No.	Descripción	No.	Descripción
1	Probeta	5	Cilindro neumático
2	Contenedor	6	Motor
3	Disco móvil	7	Dado
4	Disco fijo		

*Nota.* En la tabla se enlista los componentes de la opción A de la figura 41.

**Comparativa:**

Para seleccionar la mejor opción que se adapte a las necesidades mencionadas, se definieron tres criterios fundamentales y se evaluaron las opciones. En la tabla 22, se detalla dicha evaluación.

**Tabla 22***Selección del mecanismo para dosificar probetas*

Criterios de selección	Peso	Opción A		Opción B	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Baja complejidad	35%	5	1.75	3	1.05
Facilidad de fabricación	20%	5	1.00	2	0.40
Económico	45%	5	2.25	2	0.90
<b>Total, de puntos</b>	<b>100%</b>		<b>5.00</b>		<b>2.35</b>

*Nota.* En la tabla se establecen los criterios de selección que permitirán calificar a las opciones de mecanismos para dosificar las probetas. Para baja complejidad se le otorga un peso del 35%, a la facilidad de fabricación con un peso del 20% y al costo se le designa un peso del 45%. Para calificar las opciones se establece una escala del 1 al 5 donde 1 es nada satisfactorio y 5 totalmente satisfactorio.

De acuerdo con la tabla 22, se selecciona la opción A y se decide su fabricación en impresión 3D en material ABS debido a que no serán sometidas a grandes esfuerzos.

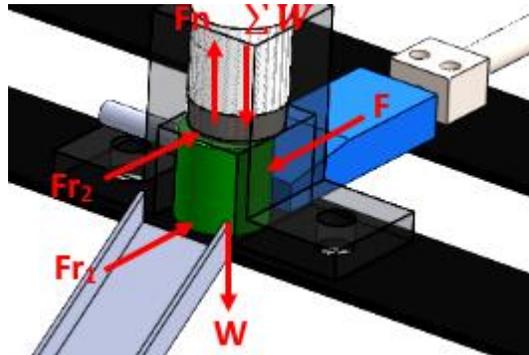
#### ***Dimensionamiento del actuador neumático***

Para dimensionar el cilindro neumático es necesario determinar las fuerzas implicadas cuando el contenedor se encuentre a su mayor capacidad. Es decir, con 4 probetas de A36 y 1 probeta de ABS. Así mismo, la presión de trabajo y la carrera del émbolo son parámetros importantes que se deben definir.

En la figura 42, se muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) de la opción seleccionada, en el caso crítico.

Figura 42

DCL del subsistema dosificador



Nota. En la figura se representa el DCL del subsistema dosificador, donde:  $F_n$  es la fuerza normal,  $Fr_1$  y  $Fr_2$  la fuerza de rozamiento entre la probeta y la base y la entre probetas respectivamente,  $F$  la fuerza necesaria para mover la probeta y  $\sum W$  los pesos de las probetas que están sobre la probeta de estudio.

### Fuerza de trabajo

La fuerza necesaria para mover una probeta es proporcional a la suma de las fuerzas de fricción cuyo coeficiente de fricción estático es igual a 0.74

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 & \sum F_y &= 0 \\ Fr_1 + Fr_2 &= F & Fn &= 4(W_{A36}) + W_{ABS} \end{aligned}$$

Para el cálculo, el peso de las probetas es conocido y la fuerza de fricción es igual al coeficiente de rozamiento estático entre las superficies en contacto (acero-acero) por la fuerza normal. Además, se considera un factor de seguridad de 1.5. Por lo tanto, la fuerza necesaria para mover la probeta es de 13.98 N.

A partir de la fuerza calculada, se analizan diámetros de émbolos entre 16 y 32 mm y se selecciona un cilindro de diámetro 20 mm. A continuación, se verifica que la fuerza otorgada sea la necesaria mediante la ecuación 3.38.

$$F = P \left[ \frac{\pi \phi^2}{4} \right] \quad (3.38)$$

Donde:

$F$  = fuerza generada por el cilindro (N)

$P$  = presión de trabajo ( $N/mm^2$ )

$\phi$  = diámetro del embolo (mm)

Se asume una presión de trabajo de 1 bar, por lo que la fuerza generada por el cilindro neumático seleccionado es de 31.42 N, de modo que se corrobora la elección del pistón de 20 mm. Además, se establece una carrera de 50 mm en base a la distancia necesaria para empujar una probeta y mantener elevada la siguiente.

#### **Cálculo del consumo de aire**

Área del pistón, carrera de ida

$$A_1 = \frac{\pi \phi^2}{4}$$

$$A_1 = 490.87 \text{ mm}^2$$

Área del pistón, carrera de retroceso. Diámetro (D) igual a 6 mm.

$$A_2 = A_1 - \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_2 = 462.60 \text{ mm}^2$$

Se calcula el caudal necesario ( $Q_n$ ) por medio de la ecuación 3.39, considerando que: L es igual a 50 mm, P es 0.5  $N/mm^2$  (5 bar) y n es 1.

$$Q_n = (A_1 + A_2)(L) \left( \frac{P + 0.101}{0.101} \right) (n \times 10^{-6}) \quad (3.39)$$

Donde:

$Q_n$  = caudal necesario ( $l/min$ )

$A_1$  = área en carrera de ida ( $mm^2$ )

$A_2$  = área en carrera de retroceso ( $mm^2$ )

$L$  = carrera del cilindro ( $mm$ )

$n$  = ciclos de trabajo (*ciclo/minuto*)

$P$  = presión ( $N/mm^2$ )

Por consiguiente:

$$Q_n = 0.29 \frac{l}{min}$$

### **Selección de electroválvulas**

Se especifican las válvulas empleadas considerando el caudal y voltaje de funcionamiento. De antemano se decidió emplear válvulas monoestables para que en caso de corte de energía se retorne a la posición inicial y mangueras de 6 mm.

Caudal necesario para mangueras ( $Q_{nm}$ ): se calcula a partir de la ecuación 3.40.

$$Q_{nm} = \left[ \frac{\pi(dm^2)(Lm)}{4 \cdot 1000^2} \right] n \quad (3.40)$$

Donde:

$dm$  = diámetro de las mangueras ( $mm$ )

$Lm$  = longitud de mangueras ( $mm$ )

$n$  = número de ciclos de trabajo (*ciclo/minuto*)

$Q_{nm}$  = caudal necesario para mangueras ( $l/min$ )

Por lo tanto:

$$Q_{nm} = \left[ \frac{\pi(6^2)(116)}{4 \cdot 1000^2} \right] (1)$$

Como resultado:

$$Q_{nm} = 3.28 \times 10^{-3} \frac{l}{min}$$

Caudal total para alimentación ( $Q_t$ ): se determina a partir de la ecuación 3.41.

$$Q_t = 2[(2 - Q_n) + Q_{nm}] \quad (3.41)$$

Donde:

$Q_t$  = caudal total para alimentación ( $l/min$ )

$Q_n$  = caudal necesario ( $l/min$ )

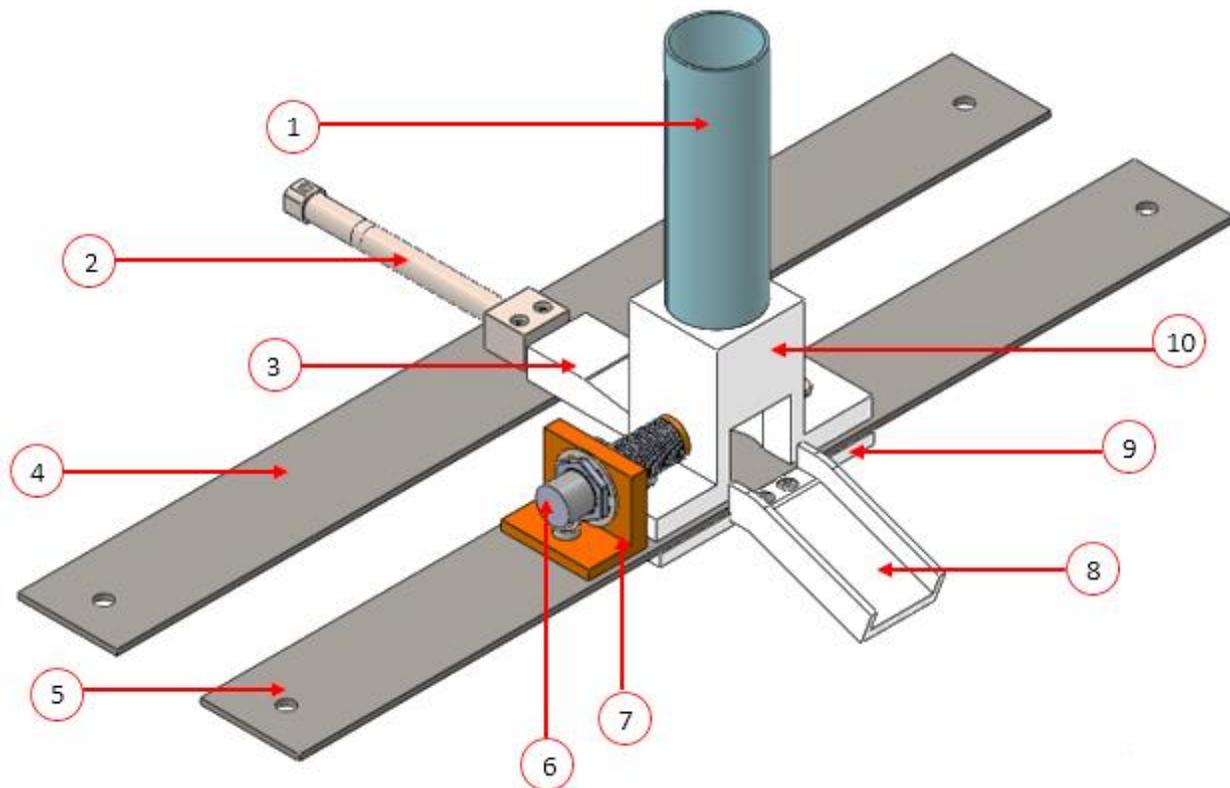
$Q_{nm}$  = caudal necesario para mangueras ( $l/min$ )

$$Q_t = 3.439 \frac{l}{min}$$

Por lo tanto, se escogió una electroválvula 5/2 de 24 VDC y de mínimo 3 [ $l/min$ ].

### ***Geometría de los componentes***

Para definir la geometría de los componentes y comprobar la funcionalidad de los mismos, en especial del dado como elemento más crítico, se realizó la simulación de movimiento basada en eventos en el software de dibujo SolidWorks. De modo que después de varias iteraciones se pudo verificar su operación al no presentarse obstrucciones obteniendo el siguiente diseño:

**Figura 43***Diseño final del subsistema dosificador*

*Nota.* En la figura se muestra el modelo CAD del diseño a implementarse del subsistema de dosificación.

**Tabla 23***Componentes del subsistema dosificador*

No.	Descripción	No.	Descripción
1	Contenedor	6	Sensor capacitivo
2	Actuador neumático	7	Soporte para el sensor
3	Dado	8	Rampa
4	Base 2	9	Soporte para la rampa
5	Base 1	10	Soporte

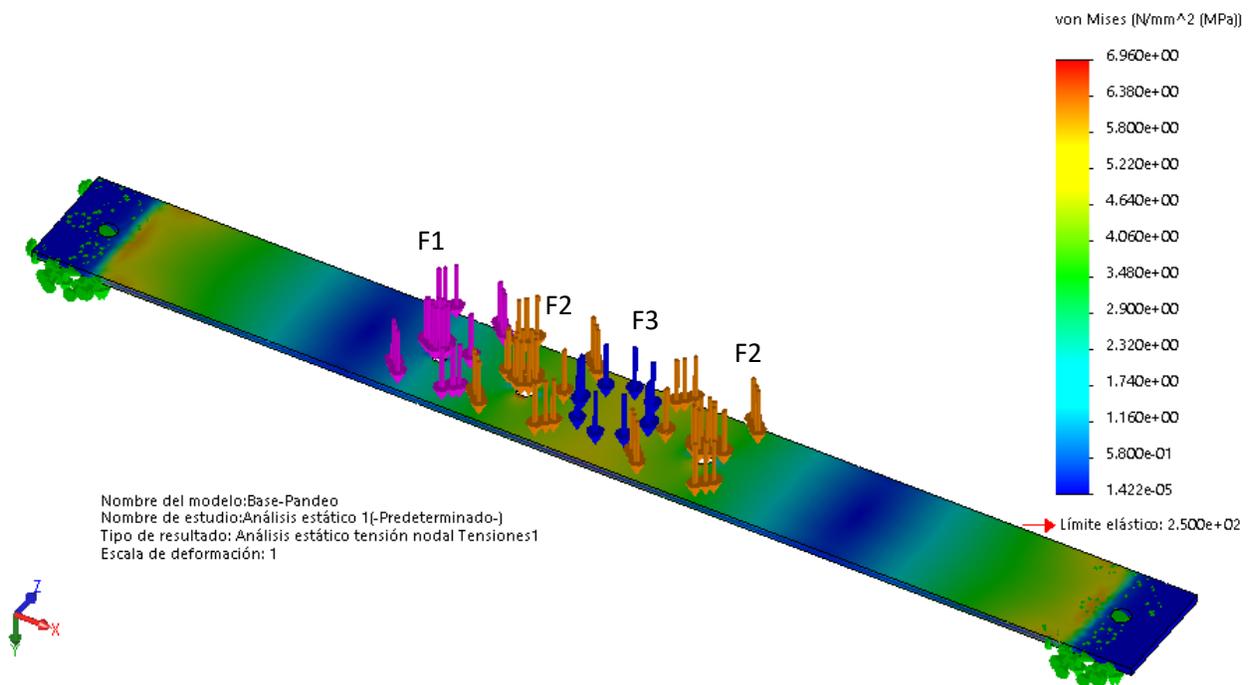
*Nota.* En la tabla se muestran los elementos que componen el modelo CAD del subsistema dosificador.

Para corroborar que el diseño definido sea lo suficientemente robusto se realizó el análisis estático por medio del software SolidWorks al elemento donde se aplican las fuerzas presentes, es decir, en la base 1 (ver tabla 23).

Para lo cual, se aplicó la teoría de fallo mediante el análisis de tensión por Von Mises y de desplazamiento cuyos resultados se presentan en la figura 44 y 45 respectivamente.

**Figura 44**

*Análisis estático de la base 1*



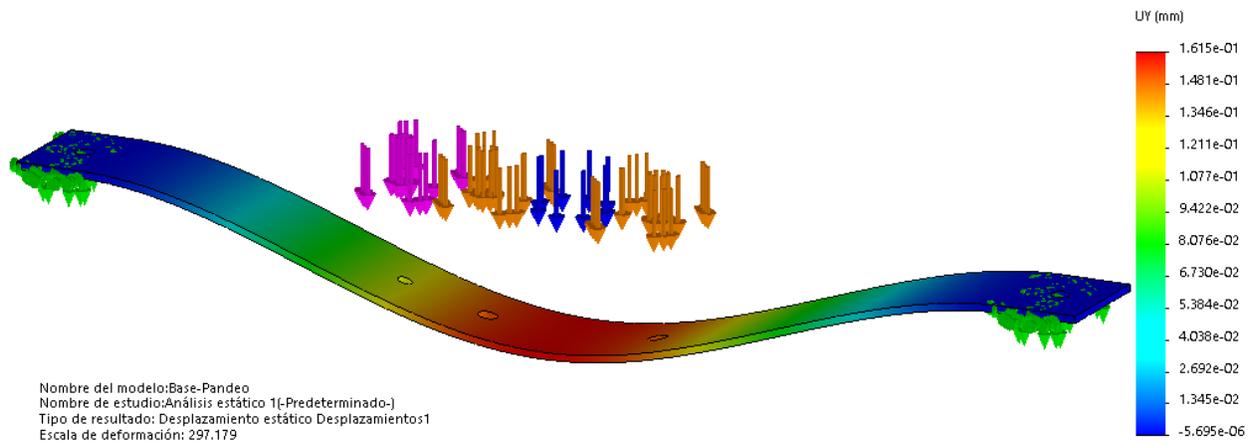
*Nota.* En la figura se muestra el resultado del análisis estático simulado en el software SolidWorks, cuyos parámetros de configuración fueron: sujeciones fijas representadas con las flechas de color verde, las cuales representan la unión y puntos de apoyo de la base y las cargas externas que corresponden al peso de los soportes mencionadas en la tabla 23.

En la tabla 24 se muestran las cargas consideradas para el análisis estático de la base 1.

**Tabla 24***Cargas presentes en la base 1*

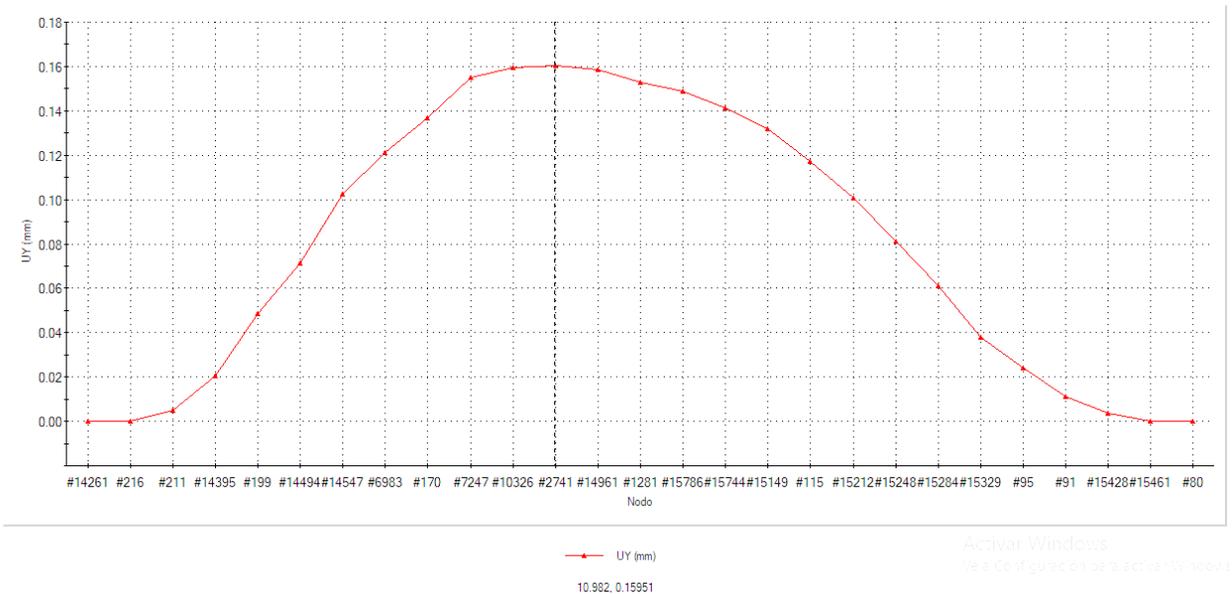
Color	Cargas	Descripción
	F1 1.227 N	Peso del soporte para el sensor y del sensor
	F2 0.844 N	Peso del soporte
	F3 6.75 N	Peso de 5 probetas de A36 y 1 de ABS

*Nota.* En la tabla se describen las cargas configuradas para el análisis estático de la base 1 del subsistema de dosificación.

**Figura 45***Análisis de desplazamiento estático de la base 1*

*Nota.* En la figura se presenta el desplazamiento estático resultante de la base 1 con un factor de exageración para hacer notorio el efecto de la carga que al ojo humano es imperceptible.

En la figura 46 se muestra el desplazamiento máximo presente en la base el cual corresponde a 0.156 mm cuyo valor no es significativo, de modo que tras analizar los resultados obtenidos se determina que la base de acero ASTM A36 de 3 mm de espesor resiste y se puede implementar.

**Figura 46***Desplazamiento estático de la base 1*

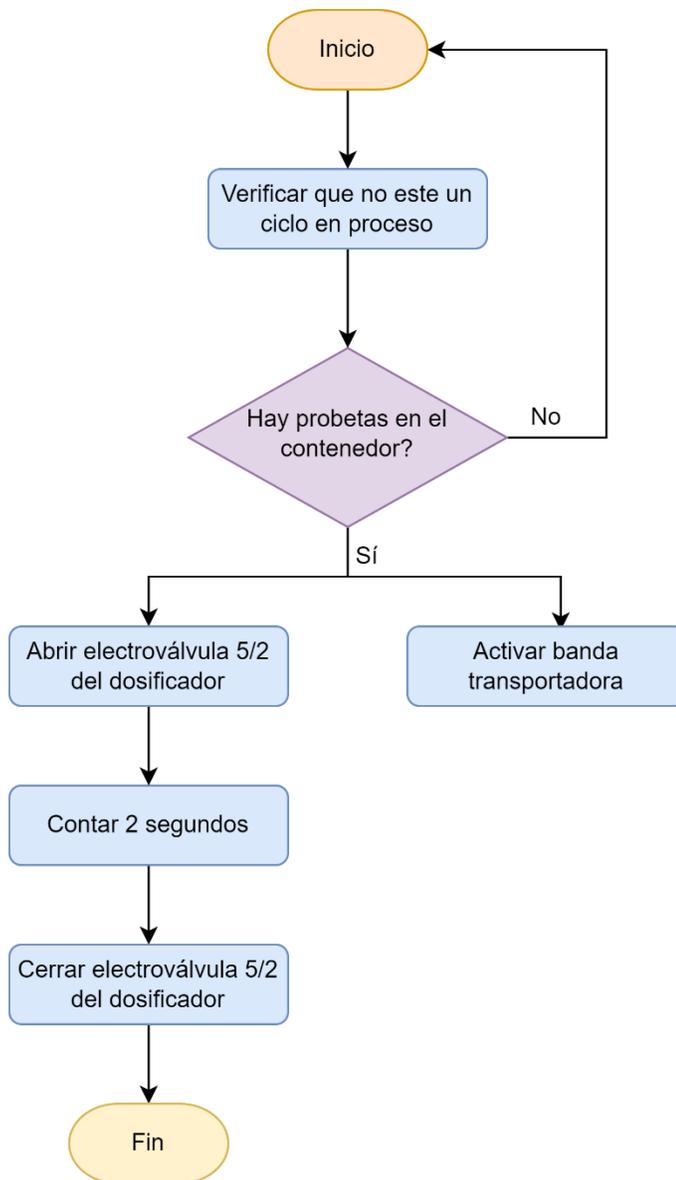
*Nota.* En la figura se representa el efecto de las cargas sobre la base 1. Se muestran los desplazamientos en la línea neutra de la base 1.

***Control del subsistema dosificador***

Para lograr una controlada dosificación de las probetas se definió la secuencia requerida para desarrollar el proceso de distribución y colocación de las probetas sobre la banda transportadora. En la figura 47 se presenta el diagrama de flujo del subsistema dosificador. Además, en la figura 48 y 49 se muestran los diagramas de potencia y control respectivamente.

Figura 47

Diagrama de flujo del subsistema dosificador.

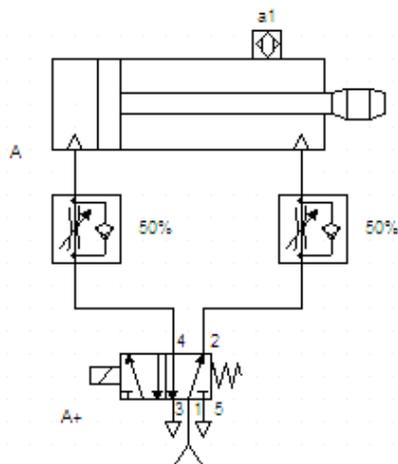


*Nota.* El diagrama de flujo del subsistema de dosificación representa lo siguiente: la función inicia cuando no este un ciclo en proceso. La apertura de la electroválvula 5/2 que comanda el cilindro neumático del subsistema de dosificación y el encendido de la banda transportadora se ejecutará si la probeta ha sido detectada en el contenedor, caso contrario no se acciona la electroválvula. Consecutivo

a la apertura de la electroválvula se contabilizará 2 segundos para indicar el cierre de la misma y por ende el retorno del vástago del cilindro neumático.

**Figura 48**

*Diagrama de potencia del subsistema dosificador*



*Nota.* En la figura se representa el circuito que comanda los componentes neumáticos del subsistema de dosificación. El cual funciona de la siguiente manera: una señal indicará la apertura y cierre de la electroválvula 5/2 (A+), lo cual permitirá el avance o retorno del émbolo del cilindro neumático (A) y cuyas velocidades dependerán de dos válvulas estranguladoras.

En la tabla 25, se muestra la nomenclatura empleada en la figura 48.

**Tabla 25**

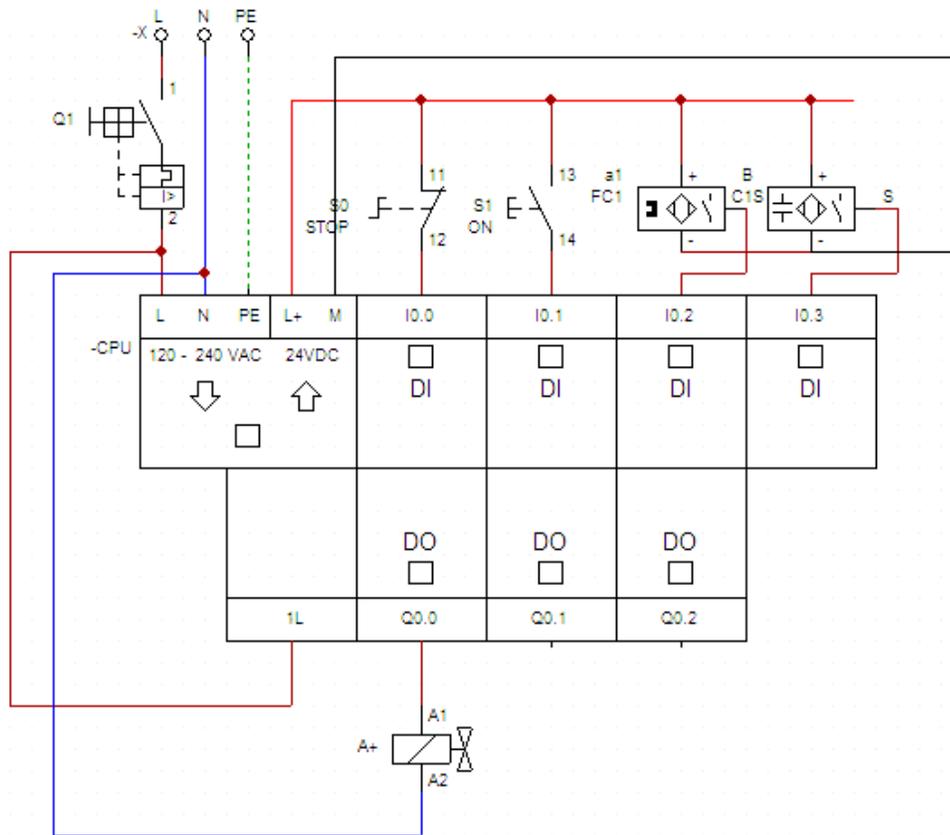
*Nomenclatura empleada para el circuito de fuerza del subsistema dosificador*

Variable	Descripción
a1	Sensor magnético
A+	Electroválvula monoestable 5/2
A	Cilindro neumático

*Nota.* En la tabla se detalla la nomenclatura empleada en el diagrama de la figura 48.

**Figura 49**

*Diagrama de control del subsistema dosificador*



*Nota.* En la figura se representa el circuito de controlará la apertura y cierre de la electroválvula de forma automática gracias al uno de un PLC. Se muestra además el equivalente físico de los bloques de detección de la probeta en el contenedor y el avance del émbolo del cilindro neumático a través del sensor capacitivo (B) y el sensor magnético (a1) respectivamente.

En la tabla 26 se detallan los componentes del circuito de control de la figura 49.

**Tabla 26**

*Nomenclatura del circuito de control del subsistema dosificador*

Variable	Descripción
a1	FC1 Sensor magnético

Variable		Descripción
B	C1S	Sensor de presencia 1
S0	PE	Pulsador de paro de emergencia
S1	ON	Pulsador de Inicio
S2	STOP	Pulsador de Paro
A+	-	Relé de la Electroválvula

*Nota.* En la tabla se describe la nomenclatura empleada en la figura 49.

### Diseño del subsistema clasificador

#### *Selección de la ventosa*

Para determinar la ventosa a emplearse se parte de los siguientes parámetros:

- Material de la pieza: A36 y ABS
- Superficie: seca, plana y lisa
- Dimensiones: diámetro y altura igual a 30 mm
- Peso: probeta de A36 (1.63 N) y probeta de ABS (0.22 N)
- Voltaje: 24 VDC
- Procedimiento de transferencia: elevación horizontal y traslado vertical

Es necesario determinar el diámetro mínimo de la ventosa brindar a partir de la ecuación 3.42, para determinar la fuerza mínima que debe brindar.

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{m(FS)}{P_{vent}(n)(\mu)}} \quad (3.42)$$

Donde:

$d$  = diámetro de la ventosa ( $mm$ )

$m$  = masa de la probeta ( $kg$ )

$FS$  = factor de seguridad

$P_{vent}$  = presión de vacío ( $N/mm^2$ )

$n$  = ciclos de trabajo (*ciclos/minuto*)

$\mu$  = coeficiente de fricción

Para el cálculo se define el factor de seguridad ( $FS$ ) a partir de la tabla 27 y el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) de la tabla 28.

**Tabla 27**

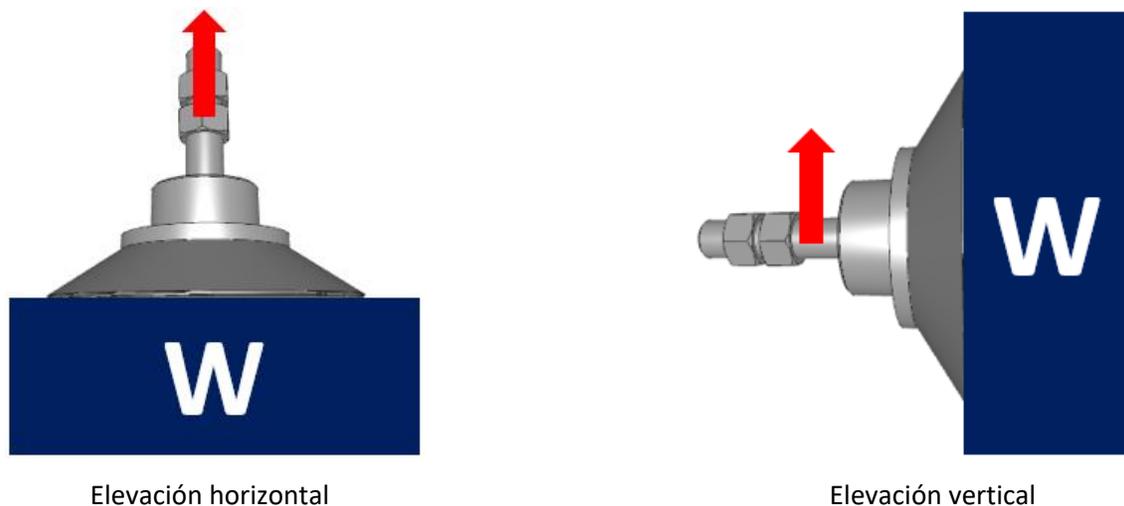
*Factor de seguridad según el tipo de elevación*

Elevación horizontal		Elevación vertical	
Dinámico	$\geq 4$	Dinámico	$\geq 8$
Estático	$\geq 2$	Estático	$\geq 4$

*Nota.* En la tabla se selecciona un factor de seguridad  $\geq 4$  para el cálculo del diámetro de la ventosa.

**Figura 50**

*Tipos de elevación con ventosas*



*Nota.* En la figura se muestra los tipos de procedimiento de transferencia generalmente usados.

**Tabla 28**

Coeficiente de fricción

Tipo de superficie	Coeficiente de rozamiento ( $\mu$ )
Aceitosas	0.1
Mojadas	0.2...0.3
Madera, metal, vidrio y rocas	0.5
Superficies rugosas	0.6

*Nota.* En la tabla se selecciona un coeficiente de fricción igual a 0.5.

Por lo tanto:

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{(0.1633kg)(5)}{\left(\frac{0.3kg}{cm^2}\right)(1)(0.5)}} \left(\frac{10\text{ mm}}{1\text{ cm}}\right)$$

$$d = 26.13\text{ mm}$$

En consecuencia, a pesar de que el cálculo determina que la ventosa debe ser de 26.1 mm, comercialmente se dispone de ventosas de diámetro 25 y 40 mm. De ahí que, se escoge el diámetro comercial de 25 mm debido a que es el más cercano al calculado y no excede el diámetro de la superficie de contacto. De modo que se verifica su utilidad a través del cálculo de la fuerza teórica considerando una presión en el interior de la ventosa de  $-0.3\text{ kgf/cm}^2$  ( $-0.294\text{ bar}$ ). Para ello se emplea la ecuación 3.43.

$$F_{TH} = (P_{at} - (-P_{vent})) \left[ \frac{\pi \phi_{vent}^2}{(4)(100)} \right] g \quad (3.43)$$

Donde:

$F_{TH}$  = fuerza teórica del interior de la ventosa (N)

$P_{at}$  = presión atmosférica ( $kgf/cm^2$ )

$P_{vent}$  = presión de vacío ( $kgf/cm^2$ )

$\phi_{vent}$  = diámetro de la ventosa (mm)

$g$  = gravedad ( $m/s^2$ )

Por consiguiente:

$$F_{TH} = (1.0132 - (-0.3)) \left[ \frac{\pi(25)^2}{(4)(100)} \right] (9.81)$$

$$F_{TH} = 63.24 \text{ N}$$

A su vez, es necesario calcular la fuerza real de la ventosa mediante la ecuación 3.44.

$$F_{R_{vent}} = \frac{F_{TH}}{FS} \quad (3.44)$$

Donde:

$F_{R_{vent}}$  = fuerza real de la ventosa (N)

$F_{TH}$  = fuerza teórica del interior de la ventosa (N)

$FS$  = factor de seguridad

Dado que el factor de seguridad (FS) corresponde al utilizado para calcular el diámetro de la ventosa se tiene:

$$F_{R_{vent}} = 12.65 \text{ N}$$

Después de haber analizado la fuerza que puede brindar la ventosa se reafirma la elección de la ventosa de 25 mm de diámetro.

Por consiguiente, se puede estimar los pesos de los componentes y obtener la fuerza de trabajo necesaria para elevar la probeta considerando un factor de seguridad de 1.5.

$$F = 4.7 \text{ N}$$

En consecuencia, se ratifica la selección del cilindro neumático de diámetro 20 mm y ya que la carrera del actuador está relacionada a la posición en la que se coloque se determinará más adelante.

### **Selección del cilindro neumático**

Se escoge inicialmente un cilindro con diámetro de émbolo 20 mm cuya fuerza de trabajo a un 1 bar es de 31.42 N y se procede a verificar su utilidad por medio del cálculo de la fuerza necesaria para levantar una probeta en el caso crítico utilizando la ecuación 3.45, es decir, con una probeta de A36. Por lo tanto:

$$Ft = W_G + W_P + W_v \quad (3.45)$$

Donde:

$Ft$  = fuerza de trabajo necesaria para el cilindro neumático (N)

$W_G$  = peso del generador de vacío (N)

$W_P$  = peso de la probeta de A36 (N)

$W_v$  = peso de la ventosa con el acople (N)

$$Ft = 0.353 + 1.633 + 0.117 = 2.104 \text{ N}$$

Por lo que, se ratifica la elección del cilindro neumático de 20 mm de diámetro del émbolo y carrera 100mm.

### **Cálculo del consumo de aire**

Debido a que el actuador neumático seleccionado es similar al del subsistema dosificador se emplean las áreas calculadas en la sección anterior y se calcula el caudal necesario, considerando que: L es igual a 100 mm y n es 1. Por lo tanto:

$$Q_n = (201.06 + 122.52)(100) \frac{0.1 + 0.101}{0.101} (1 \times 10^{-6})$$

$$Q_n = 0.064 \frac{l}{min}$$

### **Selección de electroválvulas**

Se especifica la electroválvula considerando el caudal y voltaje de funcionamiento. Se decidió emplear una válvula monoestable debido a que asegura que en caso de pérdida de la señal no exista un

cambio de posición además de la facilidad de control que otorga. A su vez, se definió el uso de mangueras de 6 mm.

*Caudal necesario para mangueras:*

Para el cálculo se emplea la ecuación 3.40 considerando la longitud de las mangueras de 230mm, por lo tanto:

$$Q_{nm} = 6.503 \times 10^{-3} \frac{l}{min}$$

*Caudal total para alimentación:* se determina a partir de la ecuación 3.41. Por consiguiente:

$$Q_t = 3.884 \frac{l}{min}$$

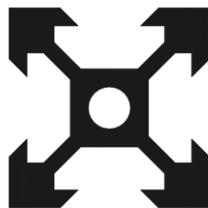
En consecuencia, se escogió una electroválvula 5/2 de 24 VDC y de mínimo 3.5 l/min.

### ***Selección de los materiales del subsistema de clasificación***

En cuanto a la construcción del subsistema de clasificación, en primer lugar, se requirieron materiales que sean de fácil montaje, en segundo lugar, que sean capaces de incorporar mecanismos para la transmisión del movimiento y finalmente que sean resistentes. En consecuencia, se determinó que la mejor opción fue utilizar los **perfiles de aluminio tipo V de 20x20 mm** cuya sección se muestra en la figura 51, los cuales se comercializan varias tiendas en el país y cuentan con una gran variedad de accesorios.

### **Figura 51**

*Perfil tipo V 20x20*



*Nota.* En la figura se muestra el perfil V de aluminio utilizado.

### ***Diseño de la estructura del subsistema de clasificación***

Para definir la geometría de la estructura del clasificador, se consideró la altura a la que se puede colocar el cilindro neumático y la distancia que el mismo debe recorrer para soltar las probetas. Otro aspecto importante para tener en cuenta es que la carrera del cilindro neumático es de 100 milímetros. Como resultado la estructura quedó como un arco compuesto de segmentos del perfil de aluminio tipo V. De los cuales dos segmentos de perfil tienen la función de pilares y el más largo la función de riel por donde se va a desplazar el carro con el cilindro neumático como se muestra en la figura 52.

### **Figura 52**

*Estructura del subsistema de clasificación*



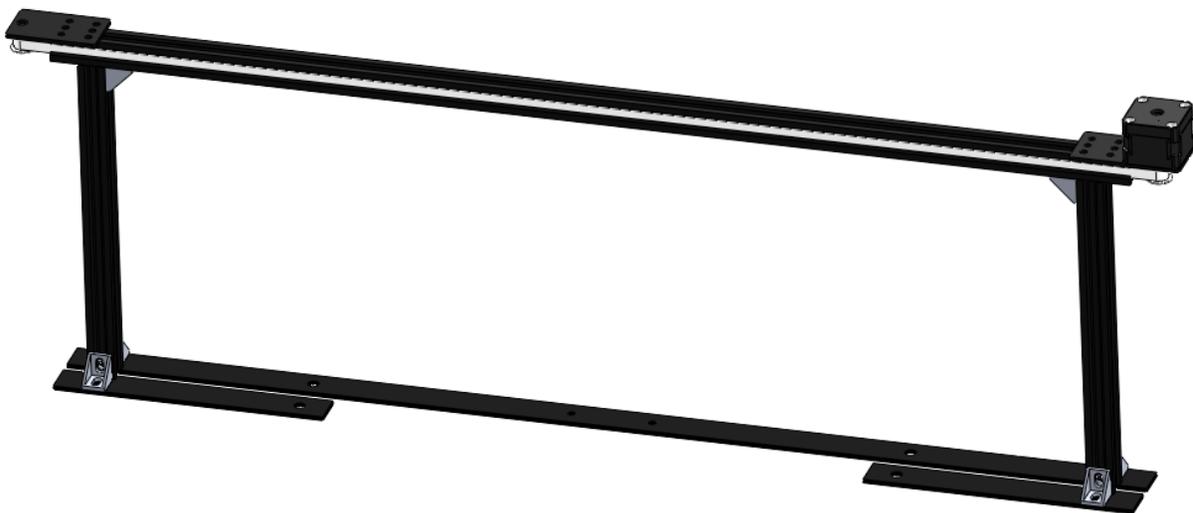
*Nota.* En la figura se muestra la estructura del subsistema de clasificación.

### ***Selección del mecanismo de transmisión de movimiento***

El cilindro neumático debe desplazarse a lo largo del eje horizontal para lo cual el mismo debe ser montado en un carro, inicialmente se consideraron dos opciones, la primera es utilizar un mecanismo de polea que es impulsado con un motor paso a paso y la segunda es la utilización de un mecanismo con un tornillo sin fin que mediante un acople es impulsado por un motor paso a paso. Entonces como resultado se hace evidente que el mecanismo de polea es el más conveniente tanto por su simplicidad de implementación como por su bajo costo. El mismo se observa en la figura 53.

### **Figura 53**

*Mecanismo de transmisión de movimiento seleccionado*



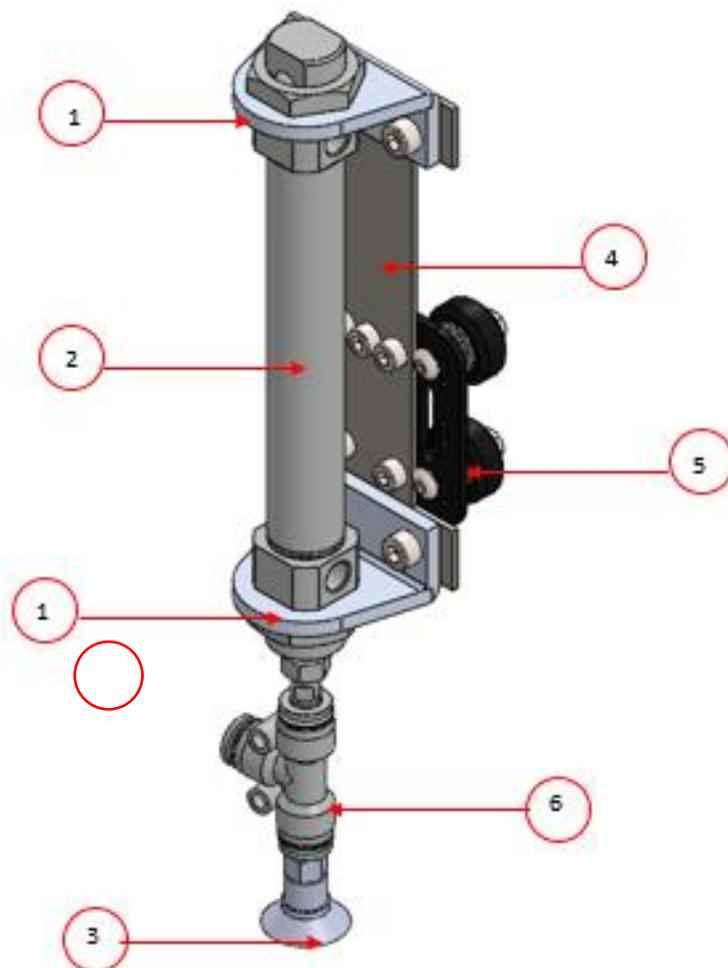
*Nota.* En la figura se presenta el mecanismo de transmisión de movimiento seleccionado.

Por tanto, es necesario un acople que permita montar y trasladar el cilindro con la ventosa sobre el perfil tipo V. Para lo cual, sé eligió un set que cuenta con ruedas de polietileno, una placa pórtico para perfil V, espaciadores de 1/4, espaciadores excéntricos de 1/4, arandelas, tuercas hexagonales, tornillos M5, etc. A su vez, para unir mediante pernos y tuercas los soportes del cilindro y por ende al cilindro con el carro se ha diseñado una platina perforada.

Puesto que la función que tiene el clasificador es la de tomar y transportar la probeta es necesario agregarle la parte neumática que consiste en una T que conecta el vástago del cilindro con la ventosa y la manguera, en la figura 54 se presenta cómo quedaría montado.

**Figura 54**

*Cilindro montado en el carro*



*Nota.* En la figura se presenta la ventosa acoplada al cilindro neumático y montada en el carrito.

**Tabla 29**

*Componentes del subsistema clasificador*

No.	Descripción	No.	Descripción
1	Soporte del cilindro neumático	4	Placa para acople entre el cilindro y el carro

2	Actuador neumático	5	Carro
3	Ventosa	6	T para acople entre el cilindro y la ventosa

*Nota.* En la tabla se enlista los componentes del modelo CAD de la figura 54.

### ***Dinámica del subsistema de clasificación***

En lo que tiene ver con la dinámica del clasificador, la misma consiste en ***un prisma de un grado de libertad*** por lo cual el análisis de la cinemática directa, y la obtención de la matriz jacobiana no son necesarias para el desarrollo del proyecto. Por lo tanto, la ecuación lagrangiana 3.46 se puede plantear directamente ya que solo existe energía cinética.

$$L = K - U \quad (3.46)$$

Donde:

$$K = \frac{1}{2} m \dot{q}^2; \text{energía cinética (J)}$$

$$U = 0; \text{energía potencial (J)}$$

Entonces el modelo dinámico descrito por la ecuación de Euler-Lagrange 3.47 queda de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (3.47)$$

Donde:

$$Q = \text{fuerza externa (N)}$$

$$q = \text{grado de libertad para posición}$$

$$\dot{q} = \text{velocidad lineal del prisma (m/s)}$$

Resolviendo la ecuación 3.47 la fuerza externa queda tal cual la segunda ley de Newton como se indica en la ecuación 3.48.

$$Q = m\ddot{q} \quad (3.48)$$

Donde:

$Q$  = fuerza externa ( $N$ )

$m$  = masa del carro ( $kg$ )

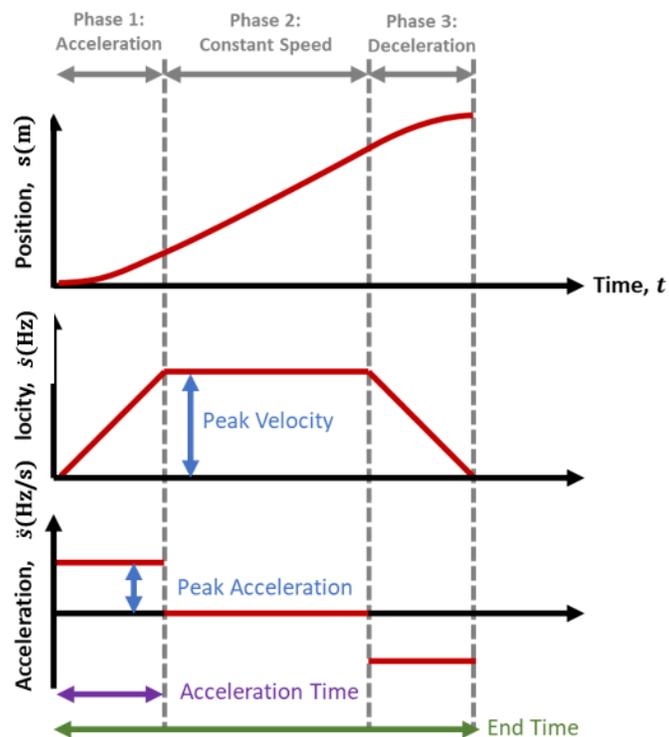
$\ddot{q}$  = aceleración del carro ( $m/s^2$ )

La masa de la ecuación 3.48 si se puede conocer, sin embargo, la aceleración se debe calcular.

Como el motor paso a paso se va a controlar mediante un PLC, la velocidad de salida del motor se expresa en Hz, cuyo perfil tiene forma trapezoidal debido a sus etapas de aceleración, velocidad constante y desaceleración, como se observa en la figura 55. Por otro lado, la posición es el desplazamiento del prisma (carro) que se expresa en m, la velocidad angular del motor paso a paso se expresa en Hz, y la aceleración y desaceleración se expresa en de Hz/ms.

**Figura 55**

*Perfil de velocidad trapezoidal*



*Nota.* En la figura se muestran los perfiles de velocidad trapezoidal. Imagen obtenida de: (Mathworks, s.f.)

Por lo tanto, la aceleración requerida para dimensionar el motor paso a paso se calcula utilizando la ecuación 3.49 definiendo una velocidad inicial, una velocidad final (velocidad constante) y un  $\Delta t$  definido por la diferencia entre el tiempo inicial y tiempo final.

$$\ddot{s} = \frac{\dot{s}_f - \dot{s}_o}{t_f - t_o} \quad (3.49)$$

Donde:

$\ddot{s}$  = aceleración ( $Hz/ms$ )

$\dot{s}_f$  = velocidad final ( $Hz$ )

$t_f$  = tiempo final ( $ms$ )

$t_o$  = tiempo inicial ( $ms$ )

Los parámetros mencionados se pueden configurar en el PLC, de este modo, se va a requerir alcanzar una velocidad final o constante de 850 Hz a partir de una velocidad inicial de 500 Hz en 1 ms, dando como resultado la siguiente aceleración.

$$\ddot{s} = 3.5 \times 10^5 Hz/s$$

Ahora es necesario transformar esta aceleración en  $rad/s^2$ , la transformación se realiza con la ecuación 3.50:

$$\alpha = \ddot{s} \left( \frac{60pf}{360} \right) \left( \frac{1min}{60s} \right) \left( \frac{2\pi rad}{1rev} \right) \quad (3.50)$$

Donde:

$\alpha$  = aceleración angular del motor paso a paso ( $rad/s^2$ )

$pf$  = ángulo de fase del motor paso a paso ( $rad$ )

La aceleración angular obtenida es bastante rápida debido a que se está trabajando con un intervalo de tiempo  $\Delta t$  que es muy pequeño, sin embargo, se lo puede obtener sin mayor problema ya que el PLC trabaja con salidas rápidas del tipo transistor.

$$\alpha = 1.222 \times 10^4 rad/s^2$$

A continuación, se obtiene la aceleración lineal que se tiene en el extremo de la polea del motor a pasos, considerando que las poleas que se utilizan para los perfiles tipo V tienen un diámetro de 16 mm, entonces se obtiene la siguiente aceleración lineal con la ecuación 3.51.

$$a_t = \alpha r_{polea} \quad (3.51)$$

Donde:

$a_t$  = aceleración lineal del motor paso a paso ( $m/s^2$ )

$r_{polea}$  = radio de la polea del motor paso a paso ( $m$ )

$$a_t = \ddot{q} = 97.738 \text{ m/s}^2$$

Adicional, la masa del carro más la probeta de acero ASTM A36 que es la más pesada se estima alrededor de 1.2 kg, dando como resultado una fuerza requerida para mover el carro igual a:

$$Q = 110.053 \text{ N}$$

Por lo tanto, el torque requerido para mover el carro se calcula utilizando la ecuación 3.52 como brazo de palanca el radio de la polea del motor paso a paso que se plantea utilizar, dando como resultado:

$$\tau = Q r_{polea} \quad (3.52)$$

Donde:

$\tau$  = torque requerido para mover el carro ( $Nm$ )

$Q$  = fuerza externa ( $N$ )

$r_{polea}$  = radio de la polea del motor paso a paso ( $m$ )

$$\tau = 0.88 \text{ Nm}$$

Sin embargo, este torque requerido aún está incompleto debido a que en el modelo dinámico descrito por la ecuación de Euler Lagrange no se consideró la fuerza de rozamiento generada entre las ruedas del rin que están hechas de polioximetileno (POM) correspondientes al set para perfil tipo V y del perfil tipo V que está hecho de una aleación de aluminio. De modo que el coeficiente de rozamiento

entre el polioximetileno y alguna superficie metálica es de entre 0.25 a – 0.3, así pues, que por motivos prácticos se elige el límite superior.

Por lo tanto, la fuerza de rozamiento se calcula con la ecuación 3.53:

$$f_r = F_N \mu_s \quad (3.53)$$

Donde:

$f_r$  = fuerza de rozamiento ( $N$ )

$F_N$  = fuerza normal ejercida por el carro al perfil V ( $N$ )

$\mu_s$  = coeficiente de rozamiento estático para polietileno-aluminio

$$F_N = 11.768 \text{ N}$$

$$\mu_s = 0.3$$

$$f_r = 3.53 \text{ N}$$

Para finalizar, el torque total se obtiene utilizando la ecuación 3.54 sumando el torque adicional debido a la fuerza de rozamiento como se indica a continuación.

$$\tau_{total} = \tau + (fr)(r_{polea}) \quad (3.54)$$

Donde:

$\tau_{total}$  = torque total requerido por el motor paso a paso ( $Nm$ )

$\tau$  = torque requerido para mover el carro ( $Nm$ )

$fr$  = fuerza de rozamiento ( $N$ )

$r_{polea}$  = radio de la polea del motor paso a paso ( $m$ )

$$\tau_{total} = 0.903 \text{ Nm}$$

### **Selección del motor**

Para la elección del motor se tomó en cuenta el modelo NEMA 17 y el NEMA 23. A continuación, en la tabla 30 se comparan sus principales características.

**Tabla 30***Comparación entre motores NEMA*

<b>Motor</b>	<b>Modelo</b>	<b>Máx. Velocidad (rpm)</b>	<b>Velocidad de trabajo recomendada (rpm)</b>	<b>Corriente máxima (A)</b>	<b>Torque nominal (Nm)</b>
NEMA 17	42HB34F08AB	1000	100-500	1.7	0.235
NEMA 23	57HD6013-03	1000	100-500	3	1.8

*Nota.* En la tabla se muestran los motores a pasos considerados para generar el movimiento rotacional.

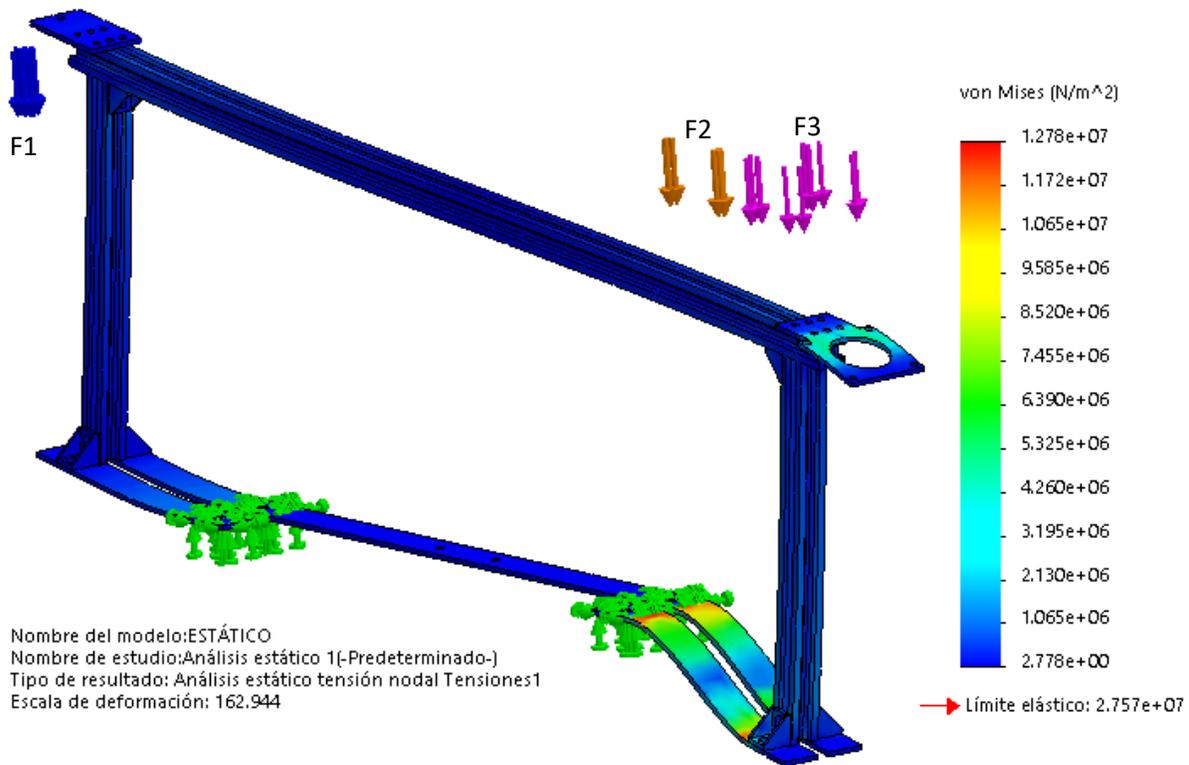
En consecuencia, de acuerdo con el torque nominal se elige el motor NEMA 23.

#### ***Análisis estático del subsistema de clasificación***

Para verificar el diseño del bastidor del subsistema de clasificación se aplica la teoría de falla por Von Mises mediante el software de simulación SolidWorks cuyo resultado se presenta en la figura 56.

Figura 56

Análisis estático del bastidor del subsistema de clasificación



*Nota.* En la figura se representa el análisis estático de la estructura del subsistema de clasificación cuyos parámetros de configuración fueron: sujeción fija en las áreas donde se apoya al perfil U del bastidor del subsistema de transporte, F1 correspondiente al peso de la polea conducida, F2 relacionada al peso del cilindro con el carrito, la ventosa y la probeta de A36 y F3 para el peso del motor a pasos. Adicional se configuró el mallado basado en curvatura para verificar la convergencia de los resultados y una escala de exageración de 300% para la visualización de los resultados.

Tabla 31

Cargas presentes en el bastidor del subsistema de clasificación

Color	Cargas	Descripción
	F1 0.677 N	Peso de la polea conducida
	F2 7.456 N	Peso del cilindro, carrito, ventosa y probeta de A36

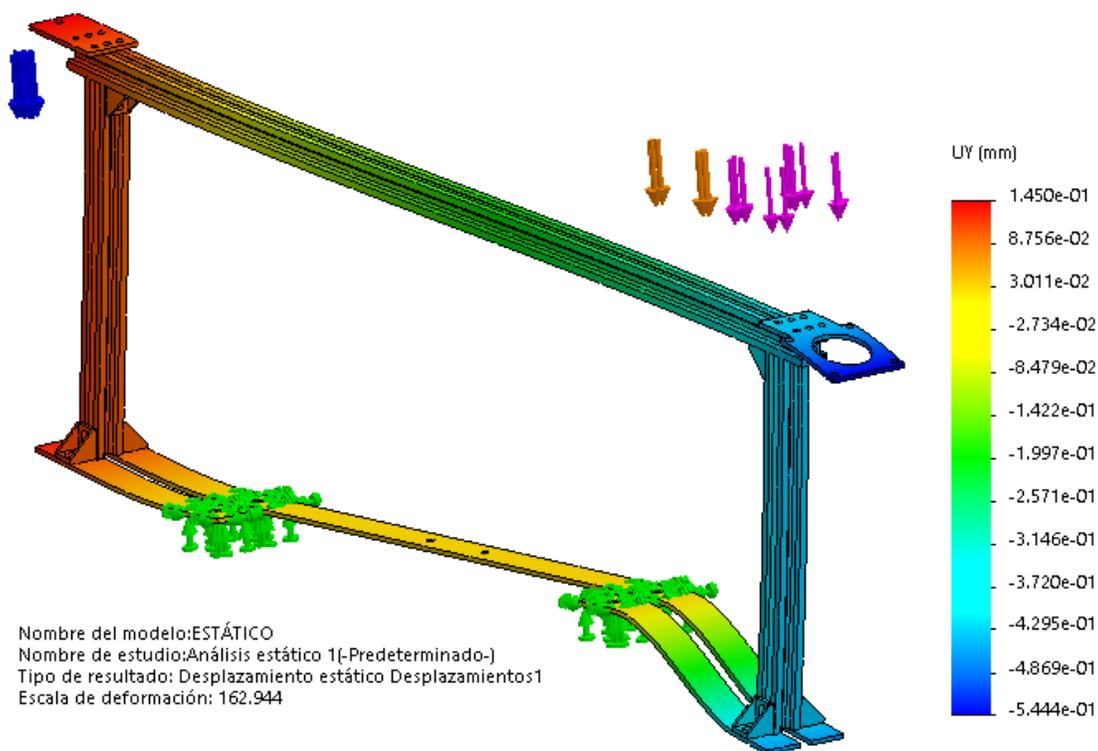
Color	Cargas	Descripción
	F3 10.301 N	Peso del motor a pasos

*Nota.* En la tabla se enlistan las cargas configuradas para el análisis estático de la estructura del clasificador.

Para el análisis estático se consideró que el cilindro se ubica al lado de más carga, resultando como elementos críticos las placas base. Por lo que se realizó el análisis de desplazamiento que se indica en la figura 57 para verificar su funcionalidad.

**Figura 57**

*Análisis del desplazamiento del bastidor del subsistema de clasificación*



*Nota.* En la figura se muestra los desplazamientos estáticos resultantes del análisis estático cuyos parámetros de configuración se detallaron en la figura 56. Adicional el resultado se presenta con una escala de exageración del 300% para que se visualice el efecto de las cargas.

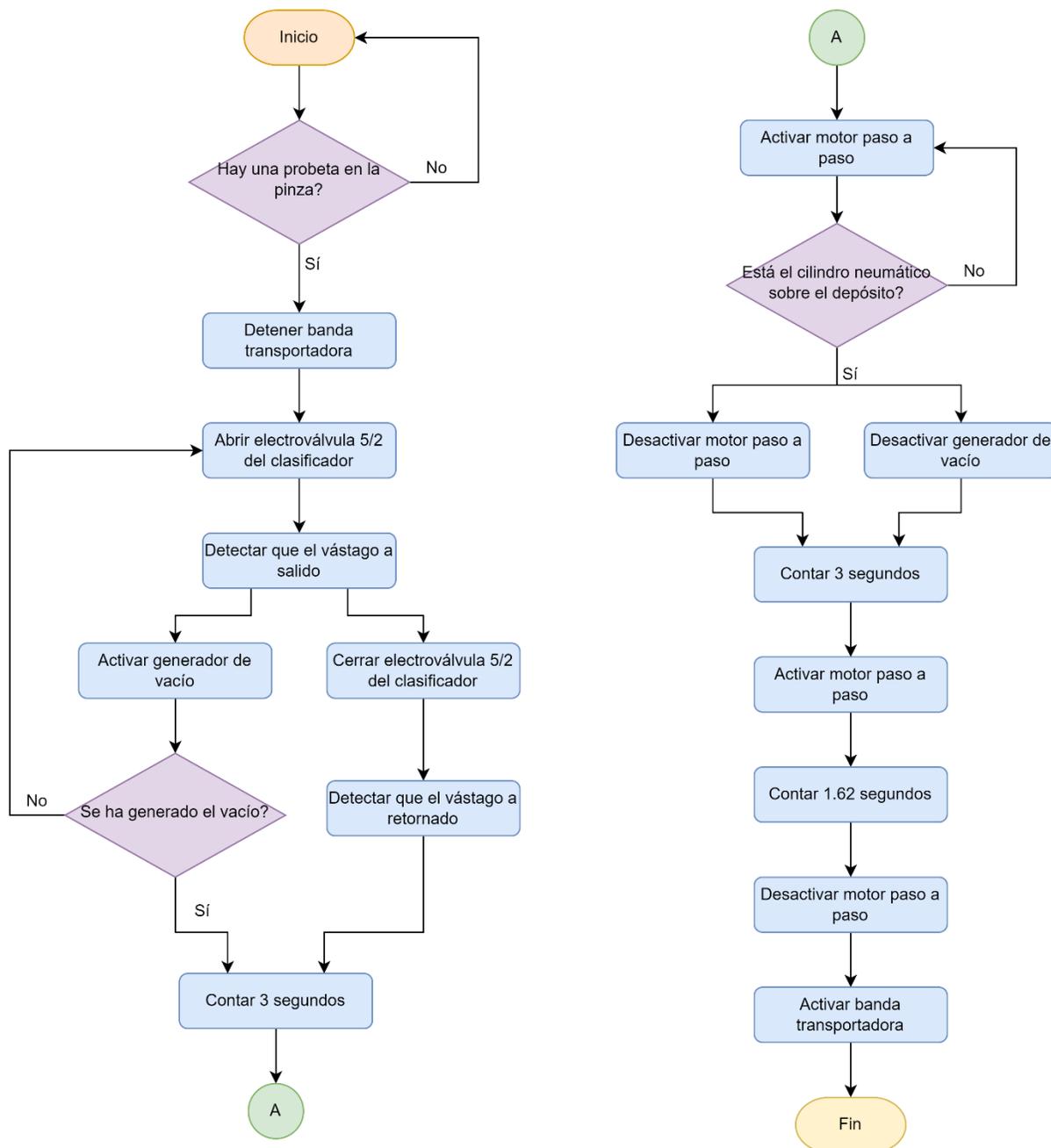
Tras analizar los resultados del análisis de desplazamiento y de Von Mises, se ratifica la selección del perfil puesto que el desplazamiento de 0.097 no es representativo y además se considera que la carga en estado de reposo se encontrará en el centro del bastidor.

#### ***Control del subsistema de clasificación***

En cuanto al control del subsistema de clasificación se considera la secuencia que se muestra en la figura 58. Y se establecen los diagramas de fuerza y control, representados en las figuras 59 y 60, respectivamente.

Figura 58

Diagrama de flujo del subsistema clasificador

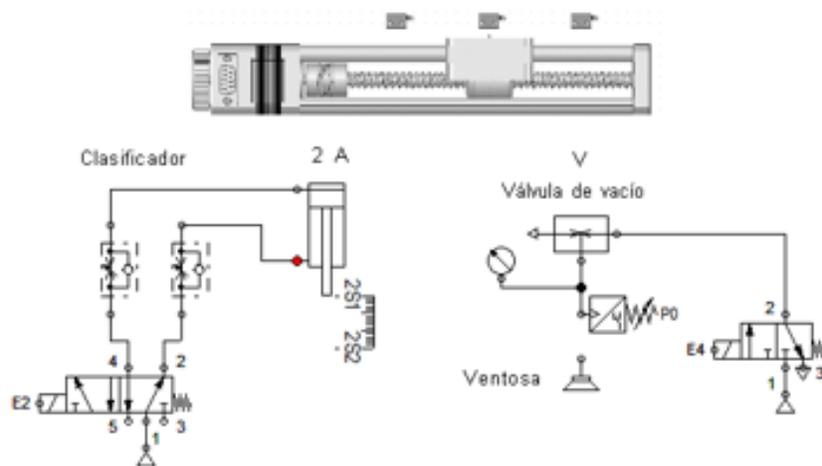


*Nota.* En los diagramas se representa el siguiente proceso: la función iniciará cuando se haya detectado una probeta en la pinza ubicada sobre la placa base donde se apoya la estructura del clasificador y la cual soporta un sensor, caso contrario no se realizará ningún movimiento. Si la respuesta es afirmativa

se procederá a detener la banda transportadora para posteriormente abrir la electroválvula que controla el actuador neumático del clasificador, seguido se detectará si se ha generado el avance del mismo lo cual permitirá activar la electroválvula encargado de generar el vacío junto con el tubo de efecto Venturi y a su vez se cerrará el paso de aire a la electroválvula del cilindro para indicar que este debe retornar. Continuo se detectará si el retorno del vástago del cilindro y se verificará la presión de vacío generada lo cual indicará que debe empezar el conteo de 3 segundos para indicar la activación del motor paso a paso, si no e se generado el vacío se creará un bucle que se visualizará como el avance y retorno consecutivo del vástago del cilindro hasta que logre generar el vacío necesario. Posterior a la activación del motor a pasos, esta permanecerá hasta que se haya detectado que se encuentra ubicado sobre el depósito, lo cual a su vez indicará su desactivación y el cierre de la electroválvula encargada de la generación de vacío. Consecuentemente se habrá colocado la probeta en el depósito por lo que finalmente, deberá retornar el carrito con el cilindro y la ventosa a su ubicación inicial. Para ello, se establece un estado de verificación de 3 segundos para indicar la activación del motor paso a paso para que en un tiempo de configuración de 1.62 se ubique en el centro y por tanto se desactive el actuador y se active la banda transportadora para continuar con el siguiente ciclo.

**Figura 59**

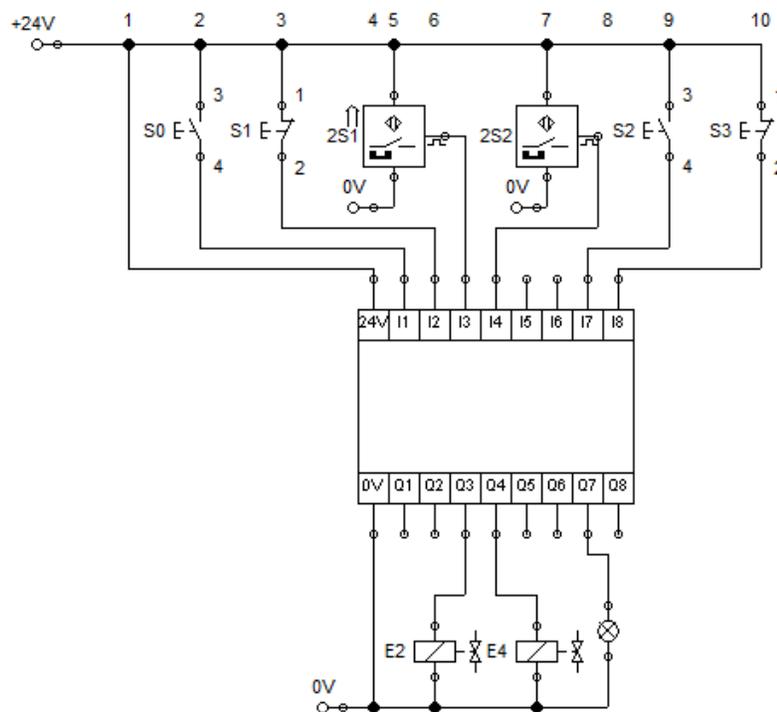
*Diagrama de potencia del subsistema clasificador*



*Nota.* En la figura se representa el circuito que comanda el avance y retorno del actuador neumático y la generación de vacío para la sujeción de la probeta. El funcionamiento es el siguiente: una electroválvula 5/2 monoestable (E2) mediante su apertura o cierre permitirá el paso de aire para que el émbolo del cilindro neumático (2A) pueda avanzar o retornar, las velocidades de avance y retorno dependerán de las válvulas reguladoras de flujo y a su vez la detección de la posición del émbolo estará a cargo de dos sensores magnéticos (2S1 y 2S2). Adicional, para la generación de vacío se encargará una electroválvula 3/2 monoestable cuya apertura o cierre permitirá el paso de aire hacia una válvula de vacío que actúa según el principio de efecto Venturi cuya función es generar una presión de vacío, la cual será medida por un presostato ubicado entre la válvula de vacío y la ventosa.

**Figura 60**

*Diagrama de control del subsistema clasificador*



*Nota.* En la figura se representa el circuito de control que comandará la apertura y cierre de las electroválvulas (E2 y E4) del subsistema de clasificación. El mismo que cuenta con: dos sensores

magnéticos (2S1 y 2S2) cuya función es la de detectar la posición del émbolo del cilindro neumático. Dos fines de carrera representados en la figura como S2 y S3 cuya función es la de detectar si el carrito que ya se ha desplazado horizontalmente se encuentra sobre el depósito.

### Diseño del subsistema de reconocimiento

#### *Selección del sensor para clasificar según la naturaleza de la probeta*

Para identificar la naturaleza de la probeta, es decir, si es metal o no metal se establecen los siguientes criterios de evaluación:

**Tabla 32**

*Selección del tipo de sensor para identificar la naturaleza de la probeta*

Criterios de selección	Peso	Opción A		Opción B	
		Sensor inductivo	Sensor fotoeléctrico	Sensor inductivo	Sensor fotoeléctrico
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Facilidad de obtención	25%	5	1.25	3	0.75
Alcance de detección	25%	2	0.5	5	1.25
Económico	50%	5	2.5	3	1.5
<b>Total, de puntos</b>	<b>100%</b>		<b>4.25</b>		<b>3.5</b>

*Nota.* En la tabla se realiza la selección del sensor más idóneo para identificar la naturaleza de la probeta.

Tras analizar los resultados de la tabla 32 se selecciona la opción A, puesto que a pesar de que el alcance de detección es limitado es más económico y fácil de conseguir. Por lo tanto, la naturaleza de la probeta se identificará con un sensor inductivo.

### ***Selección de los componentes para clasificar según sus características visibles***

Para definir las características visibles a detectarse se consideró el color y la forma de las probetas, entendiendo como defecto si la probeta no es cilíndrica. Por lo tanto:

- Piezas de color: azul y violeta.
- Defectos: probetas no cilíndricas.

Por lo tanto, se deben considerar los siguientes factores:

- Calidad del detector: ojo o cámara
- Condiciones de luminosidad
- Capacidad de procesamiento de datos
- Nivel de entrenamiento y atención a los detalles

#### **Cámara**

Se dispone de una cámara web con las características descritas en la tabla 33. Para ratificar el uso de la misma, se consideró la resolución y nitidez que puede proporcionar la cámara. Adicional, como la banda transportadora no estará sometida a altas velocidades no se necesita un número elevado de cuadros por segundo (FPS).

**Tabla 33**

*Características de la cámara seleccionada*

Características	Descripción
Sensor de imagen	CMOS
Ángulo de visión	120°
Velocidad máxima de captura	30 FPS
Tipo de conexión	USB
Resolución	480p

*Nota.* Información obtenida de la hoja técnica de la cámara.

Debido a que se tiene un sistema de iluminación controlado no es necesario que la resolución de la cámara sea muy elevada, por lo tanto, se reafirma el uso de la cámara disponible.

### ***Diseño de la estructura del subsistema de reconocimiento***

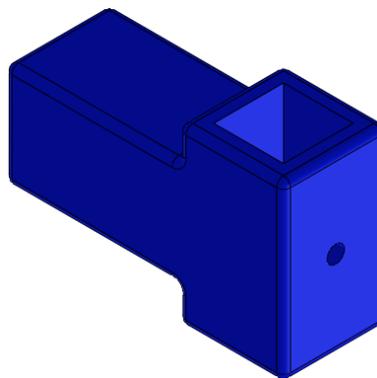
Para definir la geometría del subsistema de reconocimiento se dispuso lo siguiente:

- Que la cámara se pueda calibrar tanto en el eje vertical como en el eje horizontal
- Hacer uso del pasador de la cámara
- Que sea desmontable
- Dimensiones de los sensores a emplearse

En consecuencia, debido a la disponibilidad de material se establece emplear dos secciones de tubo cuadrado de ASTM A36 de 3/4" de 800 y 250 mm acoplados gracias a un soporte tipo T de ABS mostrado en la figura 61. De esta manera se cumple con el requerimiento de que sea desmontable y a su vez la posibilidad de calibración en el eje vertical como en el eje horizontal.

**Figura 61**

*Soporte tipo T*

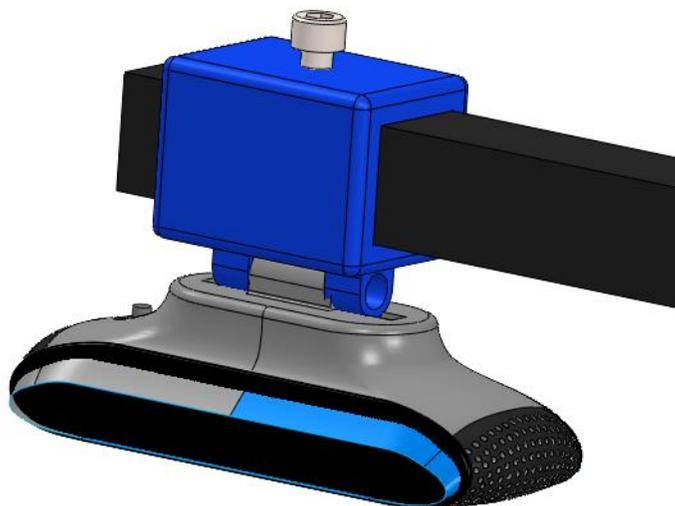


*Nota.* En la figura se muestra el soporte que permitirá unir el tubo cuadrado que posibilitará el desplazamiento vertical de la cámara con el tubo cuadrado cuya función es la de facilitar el desplazamiento horizontal de la cámara.

De igual manera se diseñó un acople para la cámara que encaje en el tubo cuadrado como se muestra en la figura 62.

**Figura 62**

*Acople para la cámara*



*Nota.* En la figura se muestra el soporte que permitirá acoplar la cámara el tubo cuadrado cuya función es permitir la calibración horizontal de la cámara.

En consecuencia, el diseño para la parte de visión artificial a implementarse es el mostrado en la figura 63.

**Figura 63**

*Subsistema de reconocimiento a implementarse*



*Nota.* En la figura se muestra la estructura para el subsistema de reconocimiento.

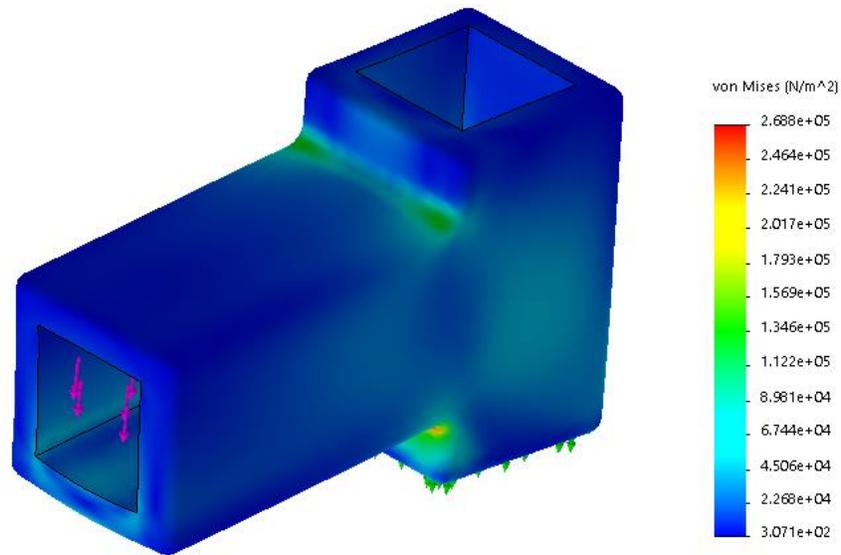
Puesto que la dimensión de los sensores depende de los disponibles en el mercado, el diseño de los soportes para los mismos se realizará en el capítulo IV.

#### ***Análisis estático de la estructura del subsistema de reconocimiento***

Para verificar que la estructura definida en la sección anterior tenga un buen diseño se aplicó la teoría de fallas por Von Mises y se analizó su desplazamiento mediante el software SolidWorks al elemento donde se tiene la mayor carga, los resultados se muestran en las figuras 64 y 65.

**Figura 64**

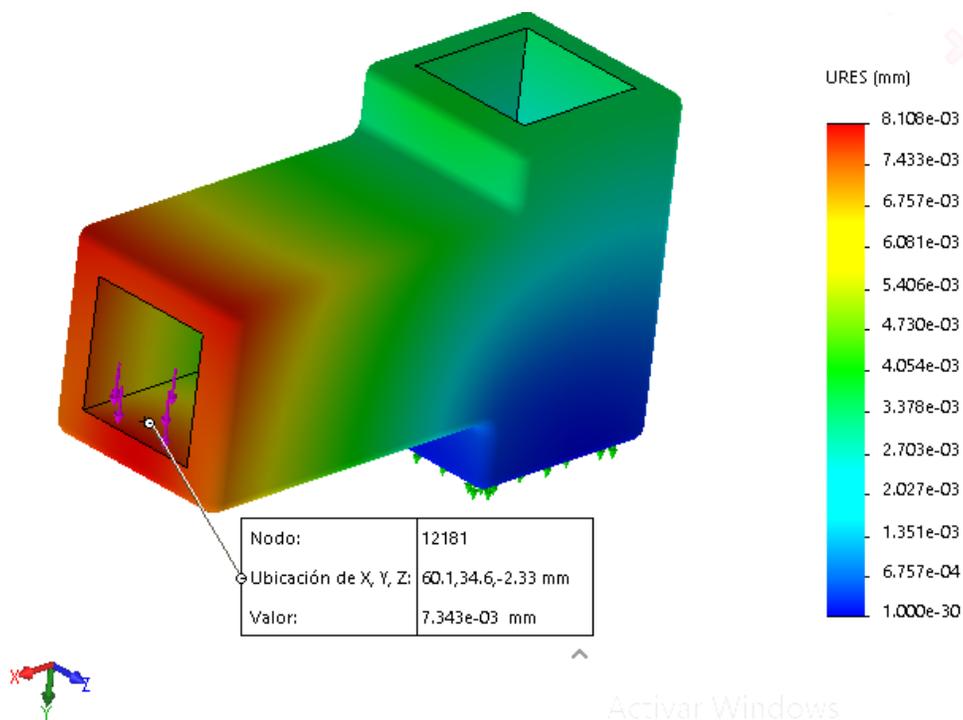
*Análisis estático del soporte tipo T del subsistema de reconocimiento*



*Nota.* En la figura se muestra los resultados del análisis estático del soporte más crítico del subsistema de reconocimiento. Los parámetros de configuración fueron los siguientes: sujeción fija en el área donde posterior a su calibración se apoya en el tubo cuadrado vertical, una fuerza (color violeta) la cual representa el peso del tubo cuadrado horizontal con la cámara y el soporte. Adicional, se configuró un mallado basado en curvatura y un factor de exageración del 300% para la presentación de los resultados.

Figura 65

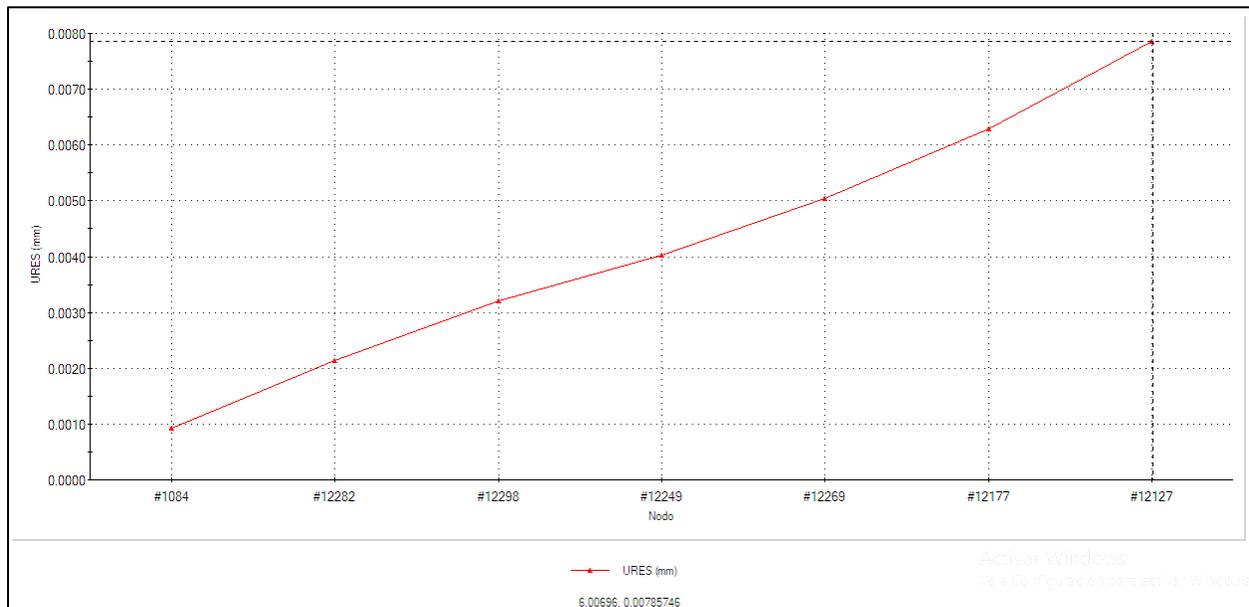
*Análisis de desplazamiento del soporte tipo T del subsistema de reconocimiento*



*Nota.* En la figura se muestra el desplazamiento resultante de la simulación del análisis estático del soporte tipo T. Además, se indica el nodo con mayor desplazamiento.

**Figura 66**

*Desplazamiento estático del soporte tipo T del subsistema de reconocimiento*



*Nota.* En la figura se muestra el desplazamiento estático resultante del análisis estático del soporte tipo T tomado en su línea neutra.

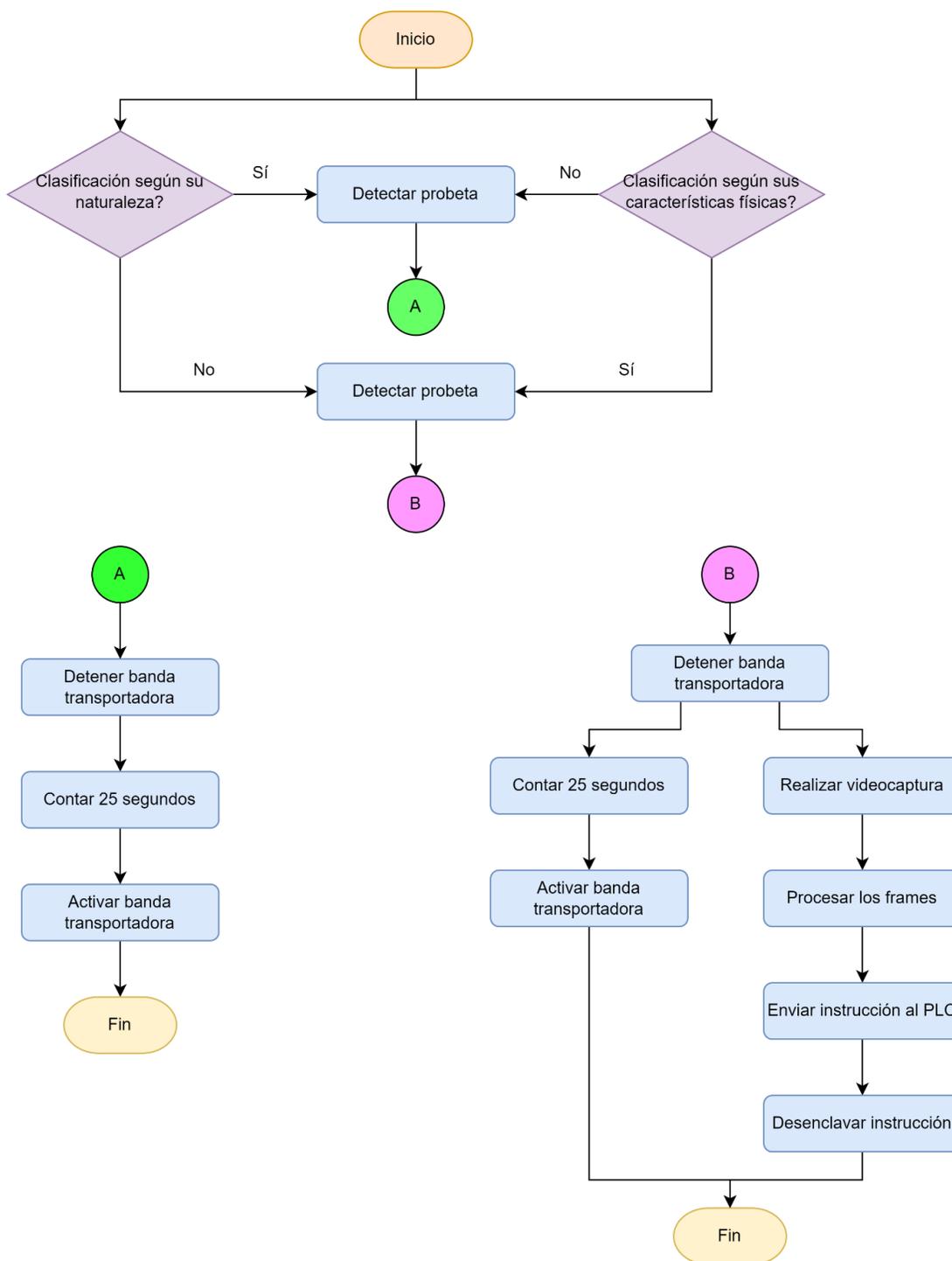
A partir de la figura 66 se obtuvo un desplazamiento máximo es de 0.007 mm como se observa en la figura 66. Por lo que posterior a analizar los resultados obtenidos se ratifica el diseño y material de los elementos que componen el subsistema de reconocimiento.

### **Control del subsistema de reconocimiento**

En cuanto al control del subsistema de reconocimiento se consideró la forma de la obtención de la información necesaria para una buena identificación sin exceder los recursos computacionales. Por lo tanto, se definió su funcionamiento a partir del diagrama de flujo de la figura 67.

Figura 67

Diagrama de funcionamiento del subsistema de reconocimiento



*Nota.* En la figura se presenta el diagrama de flujo del subsistema de reconocimiento cuyo funcionamiento es el siguiente: se inicia cuando se ha elegido el tipo de clasificación que se desea

realizar y la presencia de probetas. Para el proceso A, es decir clasificación según su naturaleza se deberá detener la banda cuando sensor capacitivo del subsistema de reconocimiento haya detectado la probeta, para posteriormente contar 25 segundos para volver a activar la banda transportadora y enviarla al subsistema de clasificación. Asimismo, para el proceso B, es decir para la clasificación según las características físicas de la misma manera se deberá detener la banda posterior a la detección del sensor, seguido iniciará el conteo de 25 segundos el cual permitirá realizar el video captura, procesar los frames, enviar la instrucción al PLC y desenclavar la instrucción para que a posterior se vuelva a activar la banda transportadora.

#### **Análisis estático de la banda transportadora**

Finalmente, como ya se conoce como está conformado cada subsistema, se puede estimar el peso de cada uno de ellos (tabla 34 y figura 68). Por lo que, se aplica la teoría de falla del diseño realizado mediante el análisis de Von Mises y del desplazamiento representados en las figuras 69 y 70 respectivamente.

**Tabla 34**

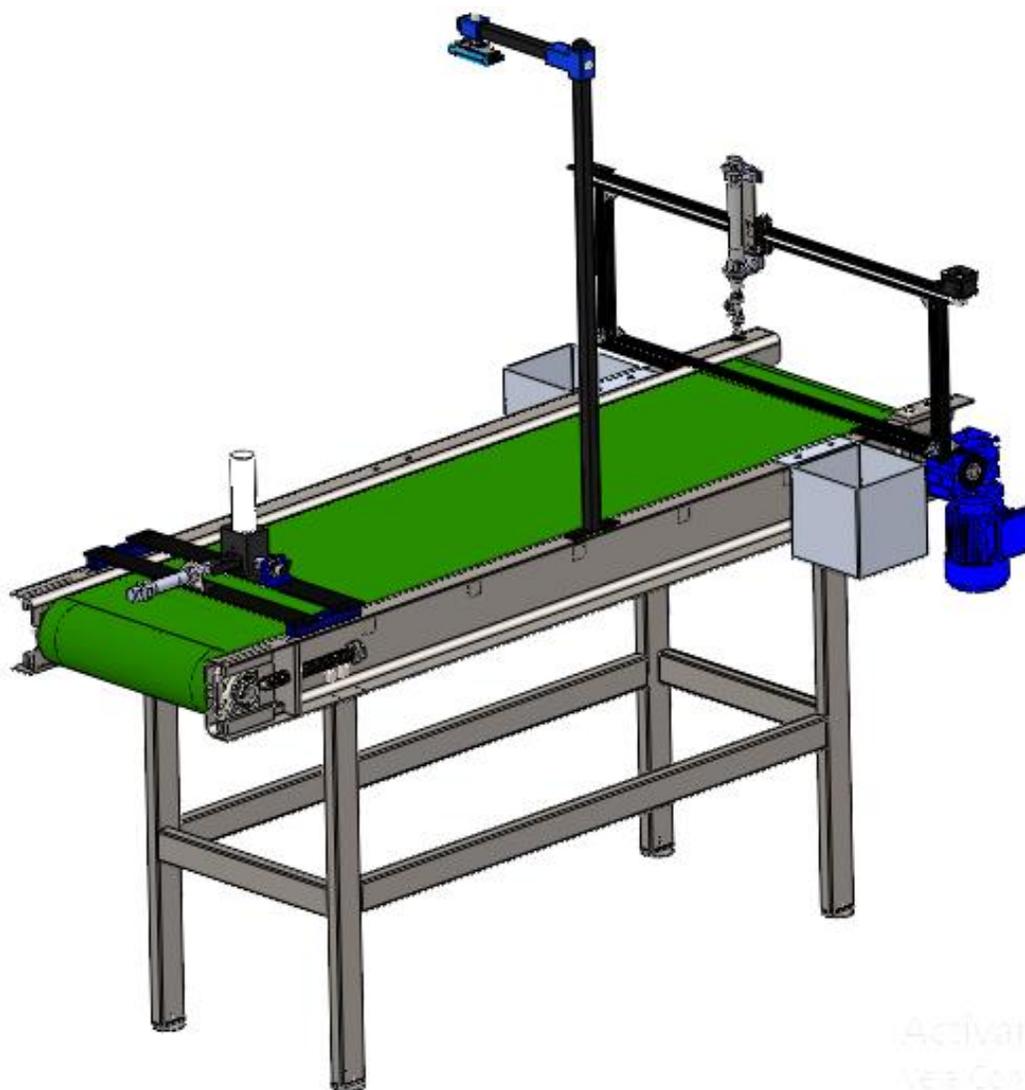
*Cargas presentes en el bastidor de la banda transportadora*

Color	Cargas	Descripción
	F1 9.022 N	Peso del subsistema dosificador
	F2 2.998 N	Peso del subsistema de reconocimiento
	F3 18.978 N	Peso del subsistema de clasificación

*Nota.* Cargas configuradas para el análisis estático.

**Figura 68**

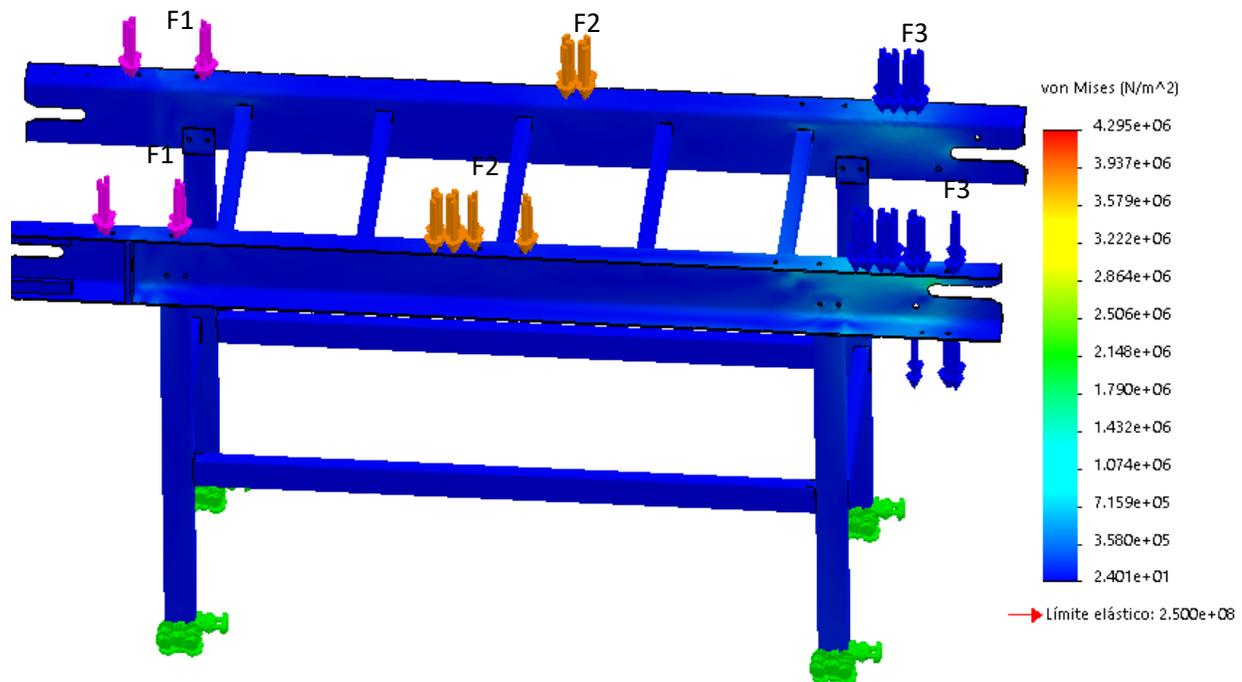
*Módulo didáctico de un clasificador industrial a implementarse*



*Nota.* En la figura se presenta el modelo CAD del módulo didáctico del clasificador industrial a implementarse.

Figura 69

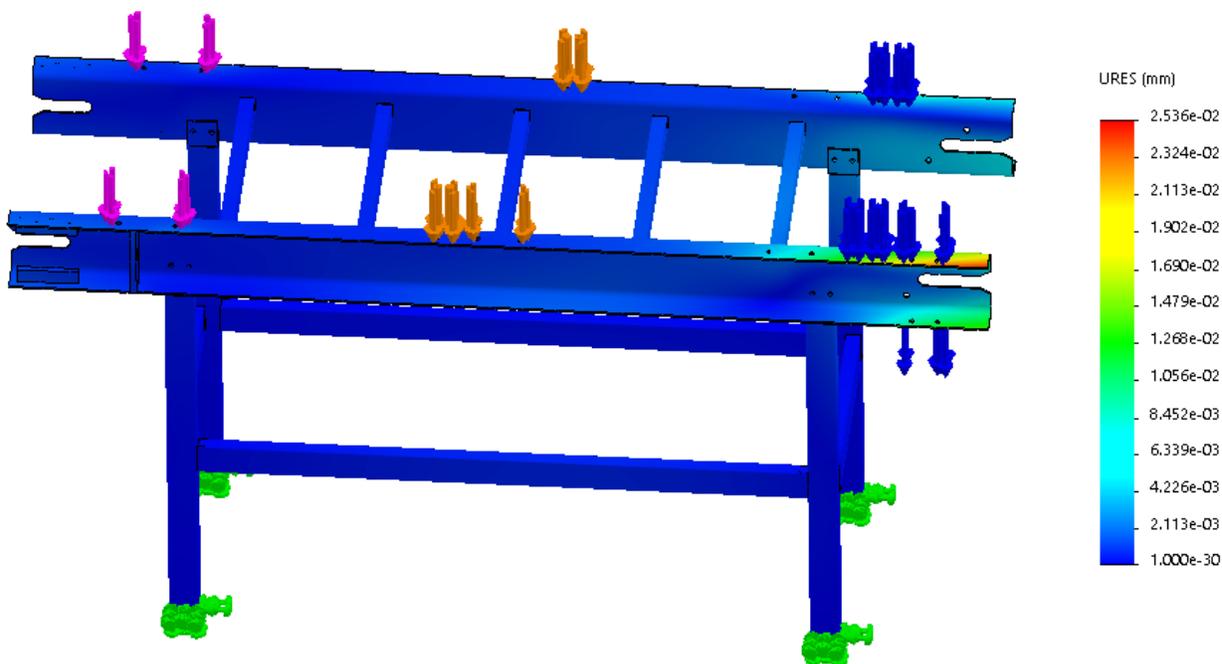
Análisis de Von Mises del bastidor de la banda transportadora



*Nota.* En la figura se muestra el resultado de la simulación del análisis estático del bastidor del subsistema de transporte. Los parámetros de configuración fueron: mallado basado en curvatura, adicional se estableció el tamaño del mallado considerando la convergencia de los resultados. A su vez, se establecieron los pesos de los subsistemas que se apoyan en la estructura los cuales están representados por F1, F2 y F3 como se indica en la tabla 34.

**Figura 70**

*Análisis de desplazamiento del bastidor de la banda transportadora*

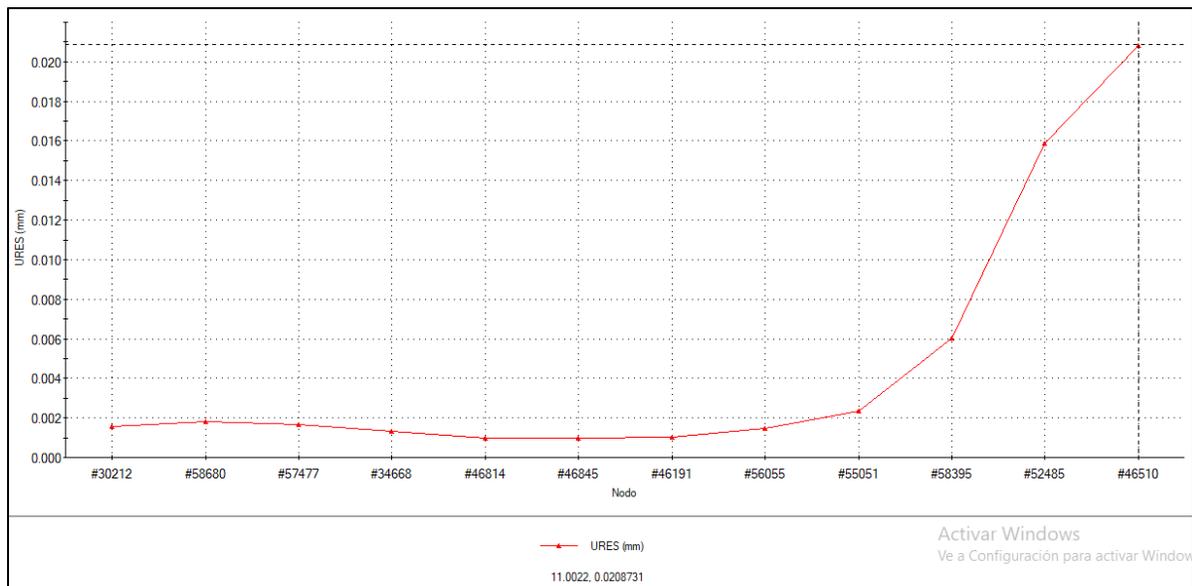


*Nota.* En la figura se muestran los desplazamientos resultantes del análisis estático de la estructura del subsistema de transporte, cuyas configuraciones fueron las descritas en la figura 69.

Posterior al análisis de desplazamiento de la figura 70 se identifica el máximo desplazamiento presente, cuyo valor de 0.02 mm se muestra en la figura 71.

**Figura 71**

*Curva de desplazamiento en la línea neutra del perfil U que soporta mayor número de cargas*



*Nota.* En la figura se representa los desplazamientos en la línea neutra del perfil tipo U que soporta mayor número de cargas.

### Resumen

En el capítulo III se definió el concepto más idóneo para cumplir con los objetivos del proyecto y a su vez se realizó el diseño de cada uno de los subsistemas establecidos a partir del análisis de la matriz QFD. Dando como resultado la banda transportadora como el componente de mayor relevancia y el mecanismo para colocar las probetas sobre la banda como el requerimiento de menor interés.

Adicional se dimensionaron y seleccionaron los elementos que componen cada subsistema como se describe a continuación:

**Subsistema de transporte:** encargado de transportar las probetas. Compuesto por: una banda horizontal con base de deslizamiento con chapa, dotada de: dos rodillos de 4 pulgadas de diámetro de acero ASTM A36 con capacidad de carga de hasta 15.48 kg/rodillo, una cinta de PVC de 370x3019x3 mm,

dos tensores fijos encargados de empujar las chumaceras de 3/4", un motorreductor de 0.25 HP,  $i=80:1$ ,  $\eta=85\%$  y factor de potencia de 0.7. Además de: un guardamotor, relé térmico y contactor de 1.6 A a 220 VAC, adicional un variador de frecuencia de 0.25 HP para el control.

***Subsistema de dosificación:*** responsable de ubicar las probetas sobre la banda transportadora. Conformado por un cilindro neumático de 20mm de diámetro y carrera de 50 mm, acoplado a un dado y ubicado sobre una base de ASTM A36 para empujar las probetas almacenadas en un contenedor por una rampa. Adicional para verificar la funcionalidad de la estructura del dosificador se realizaron simulaciones de movimiento basada en eventos, el análisis de teoría de falla por Von Mises y de desplazamiento dando como resultado un desplazamiento máximo de 0.02 mm. A su vez, para el control del sistema neumático se estableció una electroválvula monoestable 5/2 de 24 VDC, un sensor magnético para detectar la posición del émbolo del cilindro y un sensor capacitivo para indicar la presencia de probetas en el contenedor.

***Subsistema de clasificación:*** responsable de evacuar las probetas clasificadas. Integrado por un cilindro neumático de 20 mm de diámetro y 100 mm de carrera, acoplado a una placa con un carrito de 4 ruedas para obtener un movimiento traslacional mediante un mecanismo de polea, generado gracias al giro de un motor paso a paso NEMA 23 de 1.8 Nm. El mismo que se definió a partir de: el análisis de la cinemática del clasificador, los parámetros a configurarse en el PLC, el perfil trapezoidal de la velocidad y las pérdidas debido a la fuerza de rozamiento, dando como resultado un torque necesario de 0.9 Nm. Además, se dimensionó y seleccionó una ventosa de 25mm de diámetro con una fuerza de trabajo de

4.7 N a -0.3 bar y con un factor de seguridad de 1.5, para una manipulación segura de las probetas.

Adicional, se realizó el análisis estático del bastidor del clasificador y se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.097mm. Por otra parte, en cuanto al control se estableció el uso de un sensor capacitivo, dos fines de carrera, un sensor de presión, una electroválvula monoestable 5/2 de 24 VDC y una electroválvula 3/2 de 24 VDC.

***Subsistema de reconocimiento:*** conformado por: un sensor inductivo para identificar la naturaleza de la probeta (si es metal o no metal), una cámara web de 480p sujeta a un soporte de 800 mm de altura acoplado a una platina de 1" de A36 montada en el perfil tipo U del bastidor de la banda transportadora. Adicional, se establece el protocolo de comunicación OPC UA para realizar el intercambio de datos entre el cliente (PC) y el servidor (PLC).

Finalmente, se realiza el análisis estático del bastidor de la banda transportadora considerando los pesos de cada uno de los subsistemas, de lo cual se obtiene un desplazamiento máximo de 0.02mm el cual no es significativo.

## Capítulo IV

### Implementación

En el capítulo, se presenta la implementación de cada uno de los subsistemas definidos en la sección anterior, tomando en cuenta que el elemento de mayor importancia es la banda transportadora. Se define además el tipo y características de sujeción, así como el protocolo de comunicación y la manera de manejar e intercambiar los datos.

#### **Construcción del subsistema de transporte**

Posterior al diseño realizado en la sección anterior se realiza la implementación del subsistema de transporte, considerando la modularidad y facilidad de mantenimiento. Por lo cual para la fabricación y montaje del mismo se realizaron los siguientes procesos de mecanizado:

- Taladrado
- Esmerilado
- Cortado

Además, para unir los elementos como los perfiles rectangulares del bastidor de la banda transportadora se realizó con soldadura SMAW y como se deseaba que la mesa de la banda sea desmontable se decidió su montaje mediante pernos M8 (para mayor detalle ver apéndice 3) como se observa en las figuras 72 y 73.

**Figura 72**

*Construcción de la banda transportadora*



*Nota.* En la figura se muestra el bastidor previo a la limpieza y pintado de la misma.

**Figura 73**

*Montaje y fabricación de la banda transportadora*



*Nota.* En la figura se presenta el montaje de la base deslizante de chapa metálica.

A su vez, para el montaje de la chapa se realizaron dobleces para además otorgar mayor rigidez a la misma. Por otra parte, para unir la cinta se realizó el proceso de vulcanizado y se escogió el color verde debido a la disponibilidad comercial. En cuanto a los rodillos la estructura interior de los mismos se muestra en la figura 74.

**Figura 74**

*Composición de los rodillos*



*Nota.* En la figura se muestra la composición interna del rodillo.

Posterior a la construcción y unión de cada uno de los elementos que conforman el subsistema de transporte se realizó el proceso de limpieza y pintura como se observa en la figura 75.

**Figura 75**

*Bastidor de la banda transportadora pintado*



*Nota.* En la figura se presenta el bastidor de la banda transportadora.

De modo que se obtuvo la banda transportadora de la figura 76, la cual fue sometida a pruebas de funcionamiento mediante la energización del motorreductor y a su vez para tensar adecuadamente la cinta.

### **Figura 76**

*Banda transportadora construida*



*Nota.* En la figura se presenta la banda transportadora fabricada.

### **Selección de los sensores del módulo didáctico**

Previo a la construcción de los subsistemas restantes es necesario definir las características de los sensores que se van a emplear partiendo de la alimentación disponible (24 VDC y 110 VAC) y de la facilidad de acondicionamiento que estos proporcionen.

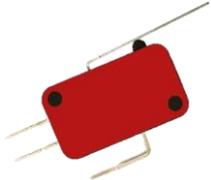
Por lo que para los sensores capacitivos e inductivo se decidió emplear con conexión a tres hilos puesto que es menos susceptible al ruido y tipo PNP debido a que son generalmente empleados a nivel industrial. A su vez, en cuanto a los sensores fines de carrera se seleccionaron en base al número de contactos requeridos, tipo de conector, la aplicación, precio y disponibilidad en el mercado.

Así mismo, es necesario detectar si se ha generado el vacío, es decir, si la ventosa ha logrado sujetar a la probeta, por lo que se determina la implementación de un sensor de presión de acuerdo con el rango de medición definido en el capítulo III en la sección 3.7.

En la tabla 35 se muestran las características de los sensores a implementarse:

**Tabla 35**

*Sensores para implementarse*

Descripción	Gráfico	Características	Modelo
Sensor capacitivo	<p><b>Figura 77</b></p> <p><i>Sensor capacitivo</i></p> 	<p>Tipo PNP de 3 hilos para 24VDC</p> <p>Rango de medición: 1mm a 5mm</p> <p>Materiales detectables: objetos metálicos y no metálicos.</p>	LJC18A3-H-Z/BY
Sensor inductivo	<p><b>Figura 78</b></p> <p><i>Sensor inductivo</i></p> 	<p>Tipo PNP de 3 hilos para 24VDC</p> <p>Rango de detección: 8mm +-10%</p> <p>Materiales detectables: hierro/aleaciones de acero.</p>	LJ18A3-8-Z/BY
Fin de carrera	<p><b>Figura 79</b></p> <p><i>Fin de carrera</i></p> 	<p>Tipo palanca con dos contactos (un NC y un NO)</p> <p>Alimentación: 24 VDC</p>	V-162-A

Descripción	Gráfico	Características	Modelo
Sensor de presión (presostato)	<b>Figura 80</b>	Rango de medición: -1 a 1 bar	DPSP1-10020G
	<i>Sensor de presión</i>	Alimentación: 24 VDC Contactos: 1 NC y 1 NO	
Sensor magnético	<b>Figura 81</b>	Tipo de Contacto: NA (1.8 MΩ al pasar el imán)	CS1-M
	<i>Sensor magnético</i>	Voltaje: DC: 5V-240V / AC: 5V-240V Tiempo de Respuesta: Max. 0.3mS Vida Útil: 5 millones de Operaciones	



*Nota.* Información obtenida de los datasheet de cada sensor.

### Construcción del subsistema de dosificación

Para la fabricación del subsistema de dosificación se empleó el proceso de manufactura aditiva mediante impresión 3D con las características detalladas en la tabla 36.

**Tabla 36**

*Parámetros de piezas impresas en 3D*

Descripción	Horas	Peso (g)	Altura de capa	Relleno
Dado	3	23	0.2	60 %
Soporte	13	86	0.1	60 %

Descripción	Horas	Peso (g)	Altura de capa	Relleno
Rampa	3	23	0.1	60 %
Soporte para el sensor	3	17	0.2	60%

*Nota.* En la tabla se presentan los parámetros de las piezas impresas en 3D del subsistema de dosificación.

Además, se consideró la tolerancia debido a la calidad de impresión, por lo que a los agujeros se aumentó en 0.5 mm al diámetro. De modo que se obtuvo las piezas de las figuras 82, 83, 84 y 85 correspondientes al dado, soporte, rampa y soporte para el sensor capacitivo respectivamente (para mayor detalle ver apéndice 3)

### **Figura 82**

*Dado del subsistema de dosificación*



*Nota.* Dado impreso en 3D.

### **Figura 83**

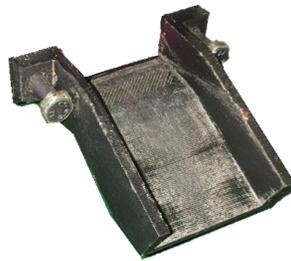
*Soporte del subsistema de dosificación*



*Nota.* Soporte para guiar el dado y apilar las probetas.

**Figura 84**

*Rampa del subsistema de dosificación*



*Nota.* Rampa para ubicar las probetas sobre la banda transportadora.

**Figura 85**

*Soporte para el sensor capacitivo del subsistema de dosificación*



*Nota.* Soporte para el sensor capacitivo.

Para montar las piezas impresas en 3D se implementaron dos bases de acero A36 y dos pedazos de tubo cuadrado de 3/4 "para dar un espacio de al menos 15 mm entre la banda y las bases para poder manipular las tuercas que sujetan las piezas y así facilitar el montaje y desmontaje.

Adicional para el montaje del cilindro neumático **ISO MI D20MM C50MM** se adquirió una sujeción comercial **ISO D20/25MM** para su montaje, de tal forma que el subsistema de dosificación implementado se muestra en la figura 86.

**Figura 86**

*Subsistema de dosificación implementado*



*Nota.* Subsistema de dosificación construido.

#### **Construcción del subsistema de clasificación**

En cuanto a la fabricación de los componentes que conforman el subsistema de clasificación se emplearon los siguientes procesos de mecanizados:

- Corte
- Perforado
- Corte láser
- Esmerilado

Además, se empleó manufactura aditiva para las piezas con geometría específica como los soportes para los sensores como se observa en las figuras 87 y 88.

**Tabla 37**

*Características de piezas impresas en 3D del subsistema de clasificación*

Descripción	Horas	Peso (g)	Altura de capa	Relleno
Soporte para los fines de carrera	5	29	0.1	60 %
Soporte para sensor de presión	5	25	0.1	60 %
Pinza soporte para el sensor	7	55	0.1	60 %

*Nota.* En la tabla se muestran las características de las piezas impresas en 3D del subsistema de clasificación.

**Figura 87**

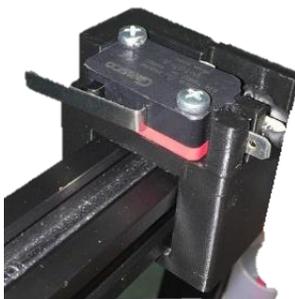
*Soporte para el sensor capacitivo*



*Nota.* Pinza para ubicar la probeta y soportar el sensor capacitivo.

**Figura 88**

*Soporte para los fines de carrera*



*Nota.* Soporte para fijar los fines de carrera.

Es importante mencionar que el soporte de la figura 87 no solo tiene la función de sostener al sensor capacitivo sino además de ubicar y mantener en una posición fija a la probeta para que el cilindro neumático con la ventosa puedan sujetarla y evacuarla a su correspondiente depósito. Así mismo, el soporte de la figura 76 debe estar completamente fijo, pues de este depende el retorno del carro con el cilindro neumático para que se ubique colineal a la pinza. También se requiere sujetar el sensor de presión por lo que se realiza una pieza en impresión 3D la cual se ensambla sobre el cilindro neumático como se muestra en la figura 89.

### **Figura 89**

*Soporte del sensor de presión montado en el cilindro neumático*



*Nota.* Soporte para el sensor de presión encargado de medir la presión de vacío.

De igual modo se realizó el corte láser en MDF de la base para sujetar el motor NEMA 23 (ver figura 90) el cual quedó ensamblado como se muestra en la figura 91.

**Figura 90**

*Soporte para el motor paso a paso*



*Nota.* Soporte de MDF para acoplar el motor NEMA 23 al perfil V.

**Figura 91**

*Motor paso a paso NEMA 23 ensamblado en el perfil V*



*Nota.* Motor NEMA 23 acoplado a la estructura del subsistema de clasificación.

A continuación, se presenta en la figura 92 el soporte con el cual se montó la polea en el extremo del perfil V.

**Figura 92**

*Soporte para la polea*



*Nota.* Placa soporte de aluminio para acoplar la polea conducida.

De igual manera el cilindro neumático que se uso es un **ISO MI D20MM C100MM** por lo tanto al ser comercial tiene aditamentos para su montaje, se han optado por utilizar los soportes tipo pies de cilindro **ISO D20/25MM**, los cuales se pueden sujetar mediante tuercas y a las roscas del cilindro en ambos extremos, en la figura 93 se muestran como quedarían sujetos al cilindro acoplado a la placa con el carro.

**Figura 93**

*Cilindro con sus soportes tipo pie acoplado al carro*

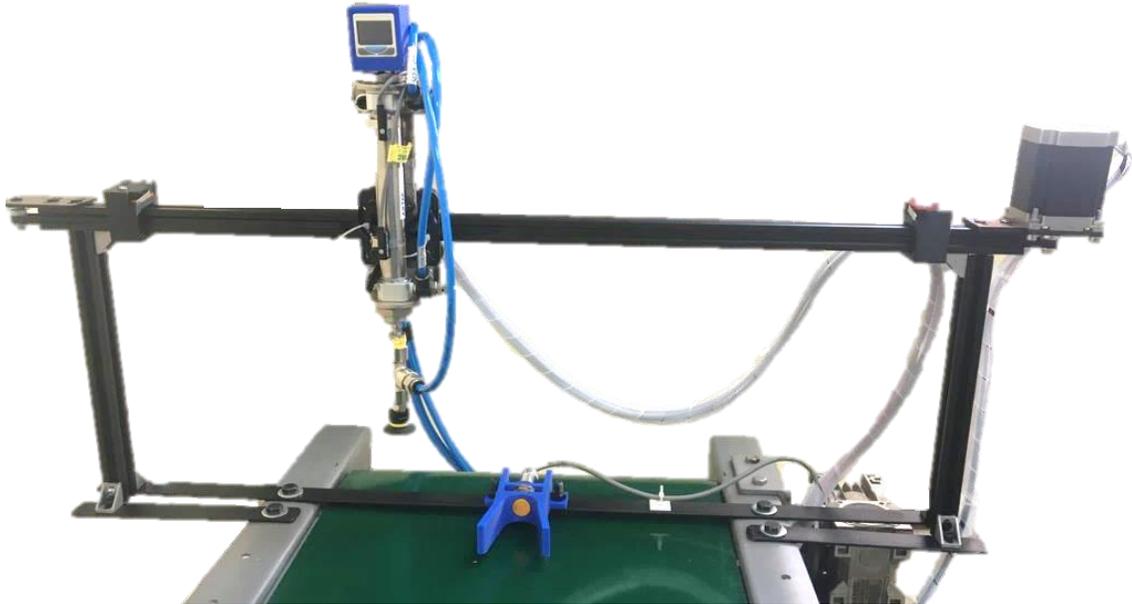


*Nota.* Cilindro acoplado al carrito montado en la estructura del subsistema del clasificador.

En consecuencia, el subsistema de clasificación implementado se presenta en la figura 94.

**Figura 94**

*Subsistema de clasificación implementado*



*Nota.* Subsistema de clasificación construido.

### **Construcción del subsistema de reconocimiento**

Para la construcción del subsistema de reconocimiento se emplearon los siguientes procesos de mecanizado:

- Corte
- Esmerilado
- Perforado

A su vez para unir la placa que se montará en el perfil tipo U del bastidor de la banda transportadora con pernos M8 se empleó soldadura SMAW.

Debido a que ya se definieron y adquirieron los sensores que conforman el subsistema de reconocimiento se realizó el diseño y se determinó que por su geometría y la de los soportes para acoplar la cámara y unir los perfiles es necesario fabricarlos en impresión 3D, por lo que las características se detallan en la tabla 38.

**Tabla 38**

*Características de las piezas impresas en 3D*

Descripción	Horas	Peso (g)	Altura de capa	Relleno
Soporte sensores	5	43	0.1	60 %
Soporte T	5	23	0.1	60%
Soporte cámara	11	55	0.1	60%

*Nota.* Características de las piezas impresas en 3D del subsistema de reconocimiento.

De modo que el subsistema de reconocimiento implementado se muestra en la figura 95.

**Figura 95**

*Subsistema de reconocimiento implementado*



*Nota.* Subsistema de reconocimiento implementado.

## Diseño e implementación del tablero de potencia y control

Para la implementación del tablero de potencia y control es prioritario definir el PLC con el que se va a trabajar y las dimensiones de las protecciones que se van a integrar. Además, se establecieron las siguientes características:

- Tensión de alimentación disponible: 110 VAC y 24 VDC.
- Número de entradas requeridas: 15
- Número de salidas requeridas: 7
- Número de salidas rápidas requeridas: 2
- Protocolo de comunicación: OPC UA, Ethernet
- Protección para la línea de potencia
- Protección para la línea de control
- Protección para el PLC
- Un pulsador de “Inicio”
- Un pulsador de “Paro”
- Un pulsador de “Paro de emergencia”
- Un selector de dos posiciones para escoger el tipo de clasificación por visión

artificial, es decir, por color o defectos

- Un pulsador para establecer la clasificación según la naturaleza de la probeta, es decir, si es metálica o no metálica.
- Una luz piloto de color verde para indicar que el módulo está encendido
- Una luz piloto de color rojo para indicar que el módulo está apagado
- Un ventilador para enfriar al variador de frecuencia

### **Selección de elementos de protección**

Se planeaba inicialmente implementar el tablero de potencia con una alimentación de 110 VAC; no obstante, debido al uso de componentes industriales y a la intención de reducir pérdidas y manejar corrientes moderadas, se optó por implementar en el laboratorio un tomacorriente de 220 VAC bifásico. Por consiguiente, los componentes adquiridos para el circuito de fuerza (ver apéndice 4) se detallan en la tabla 39.

**Tabla 39**

*Componentes eléctricos implementados en el tablero de potencia*

Componente	Características	Modelo
Breaker	Número de polos: 3	EBS6BN
	Voltaje máximo: 415 VAC	
	Corriente: 32 A	
Guardamotor	Corriente: 2.5 a 4 A	EGV2-M08
	Número de polos: 3	
	Voltaje máximo: 240 VAC	
Relé térmico	Corriente: 2.5 a 4 A	EBS1TR-25
	Voltaje máximo: 440V	
Contactor	Voltaje de la bobina: 220 a 440 VAC	C1-D0910
	Corriente máxima: 1.6 A	

*Nota.* Información obtenida de los datasheet de los componentes.

### **Colores de cables**

A su vez, como se había dimensionado en la sección 3.5.7 se implementaron los cables descritos en la tabla 40, cuyos colores se definieron según la norma IEC 60445.

**Tabla 40**

*Cables empleados para el circuito de potencia*

Color del cable	Calibre	Descripción
Plomo	14 AWG	Fase S de la alimentación de 220VAC
Azul	14 AWG	Fase R de alimentación de 220VAC
Amarrillo	14 AWG	Neutro de la alimentación de 220VAC

*Nota.* En la tabla se muestran los cables empleados para el circuito de fuerza.

En cuanto a la definición de los elementos para el circuito de control (apéndice 4) se aplicaron algunas de las recomendaciones de la norma IEC 62208 para la implementación y distribución de tableros eléctricos con consumo menor a 1kV y a su vez la norma IEC 60445 para la definición del color de los cables, obteniendo la siguiente designación:

**Tabla 41**

*Designación de colores para cables del circuito de control*

Color del cable	Calibre	Descripción
Rojo	16 AWG	Línea positiva (+) de 24 VDC
Blanco	16 AWG	Línea negativa (-) de 24 VDC
Negro	16 AWG	Señales de 24VDC

*Nota.* Cables empleados para el circuito de control.

### **Borneras**

Para definir el calibre del cable para el circuito de control se consideró los calibres recomendados por los fabricantes de PLCs y la tensión de alimentación empleada. Por otra parte, se implementó la conexión a tierra de todo el gabinete de control según la norma, para lo cual se designó los colores recomendados según la norma IEC 60445.

Asimismo, en base a las recomendaciones de la norma para la distribución de tableros y a las características de los componentes a implementarse se definió lo siguiente:

- 4 borneras de doble piso para distribuir la alimentación AC
- 21 borneras de doble piso para distribuir la alimentación DC
- 25 borneras de doble piso para distribuir las entradas y salidas del PLC
- 3 borneras simples para la tierra

Las cuales se distribuyeron como se muestra en el apéndice 5.

### **Selección de relés**

Además, fue necesario implementar 4 relés cuyas características se detallan en la tabla 42, para proteger a los elementos más sensibles y a su vez para poder controlar las salidas a las cuales se encuentran conectados.

**Tabla 42**

*Relés implementados*

Componente	Características	Descripción
Relé (F3)	Bobina de 24 VDC 4 contactos NO 4 contactos NC	Protege a la electroválvula 5/2 del subsistema de dosificación
Relé (F4)	Bobina de 24 VDC	Protege a la electroválvula 5/2 del subsistema de clasificación

	4 contactos NO	
	4 contactos NC	
Relé (F5)	Bobina de 24 VDC	Protege a la electroválvula 3/2 del subsistema de clasificación
	4 contactos NO	
	4 contactos NC	
Relé (F6)	Bobina de 24 VDC	Permite el control del contactor K1M del circuito de potencia
	2 contactos NO	
	2 contactos NC	

*Nota.* En la tabla se detallan las características de los relés implementados para la protección y control de los actuadores.

### ***Selección del PLC***

Para la selección del PLC hay que tener en cuenta los siguientes requerimientos: alimentación de 110 V AC o 24 V DC al menos 17 entradas digitales, 9 salidas tipo transistor con al menos 2 de ellas rápidas, que cuente con conexión Ethernet y el estándar OPCUA para configurarlo como servidor para poder comunicarlo con el cliente (computadora personal) que ejecuta el programa de visión artificial. Tras solicitarle proformas de PLCs con las características indicadas a los proveedores locales, se decidió que la mejor opción tanto por sus características como por su precio fue un PLC de la marca **Schneider Electric** de la serie **Modicon M241** (ver figura 96) distribuido en Ecuador por CAMEI S.A, cuyas características se presentan en la tabla 43.

Figura 96

PLC Modicon M241



Nota. Imagen obtenida de: (Schneider Electric, 2023)

Tabla 43

Principales especificaciones técnicas del PLC Modicon M241 TM241CE40T

Categoría	Descripción
Marca	Schneider Electric
Serie	Modicon M241
Referencia	TM241CE40T
Entradas digitales	16 entradas normales y 8 entradas rápidas (contadores)
Salidas digitales	Salidas de común positivo 12 salidas de transistor normales 4 salidas rápidas (generadores de pulsos)
Tipo de terminal	Bloques de terminales de tornillos extraíbles paso 5.08 mm
Fuente de alimentación	24 V DC

Categoría	Descripción
Límites de tensión de alimentación	20.4 ... 28.8 V DC
Corriente de entrada máxima	50 A
Entrada lógica	Sink o source
Estado de tensión 1 garantizado para entrada	$\geq 15$ V DC
Estado de tensión 0 garantizado para entrada	$\leq 5$ V DC
Lógica de salida discreta	Lógica positiva (fuente)
Frecuencia de salida máxima	1 kHz para salida transistor
	20 KHz para salida rápida (modo PWM)
	100 KHz para salida rápida (modo o PTO)
Corriente de entrada discreta	5 mA para entrada
	10.7 mA para entrada rápida
Tipo de protección	Protección contra cortocircuitos
	Protección contra cortocircuitos y sobrecargas con reinicio automático
	Protección de polaridad inversa para salida rápida
Capacidad de memoria	8 MB para programa
	64 MB para la memoria RAM del sistema
Orejas terminales de anillo	Memoria flash incorporada de 128 MB para realizar copias de seguridad de los programas del usuario
Memoria externa	Tarjeta SD de 16 GB
Tipo de batería	BR2032 litio no recargable

Categoría	Descripción
Funciones de posicionamiento	PTO 4 canal(es) 100 kHz PTO 4 canal(es) para salida transistor 1 kHz
Protocolos y estándares de comunicación	Machine Expert, FTP, HTTP/HTTPS, Modbus, OPC UA, Detection de Machine Expert, SNMP, NVL, EtherNet/IP, TFTP
Número máximo de conexiones	8 servidor Modbus 8 protocolo de SoMachine 10 servidor web 4 servidor FTP 16 destino Ethernet/IP 8 cliente Modbus
Numero de esclavos	64 Modbus TCP 16 Ethernet/IP
Soporte de montaje	Riel de sombrero de copa (DIN) tipo TH35-15 acorde a IEC 60715 Riel de sombrero de copa (DIN) tipo TH35-7.5 acorde a IEC 60715
Dimensiones	Altura: 90 mm Profundidad: 95 mm Anchura: 190 mm
Peso	0.62 kg
Temperatura ambiente de funcionamiento	-10 ... 55 °C – instalación vertical -10 ... 55 °C – instalación horizontal

Categoría	Descripción
Temperatura ambiente de almacenamiento	-25 ... 70 °C
Humedad relativa	10 ... 95 % sin condensación (en funcionamiento) 10 ... 85 % sin condensación (en almacenamiento)
Grado de protección IP	IP 20 con cubierta protectora colocada

*Nota.* Obtenida de (Schneider Electric, 2023)

### **Construcción del tablero**

En cuanto a la construcción del tablero se emplearon lo siguientes procesos de mecanizado:

- Taladrado
- Corte

Fue necesario realizar perforaciones a la puerta del gabinete para colocar los pulsadores y luces indicadoras tal como se muestra en la figura 97, (para mayor detalle ver apéndice 5). A su vez, se realizaron perforaciones para que mediante unión empernada se pueda sujetar los tableros al bastidor de la banda transportadora como se presenta en la figura 98. Asimismo, en cuanto a la disposición de los tableros se consideró la fácil interacción con los elementos de comando del proceso.

**Figura 97**

*Procesos de mecanizado en el tablero*



*Nota.* En la figura se muestra el proceso de perforado en el tablero de control.

**Figura 98**

*Disposición de los tableros en el bastidor de la banda transportadora*



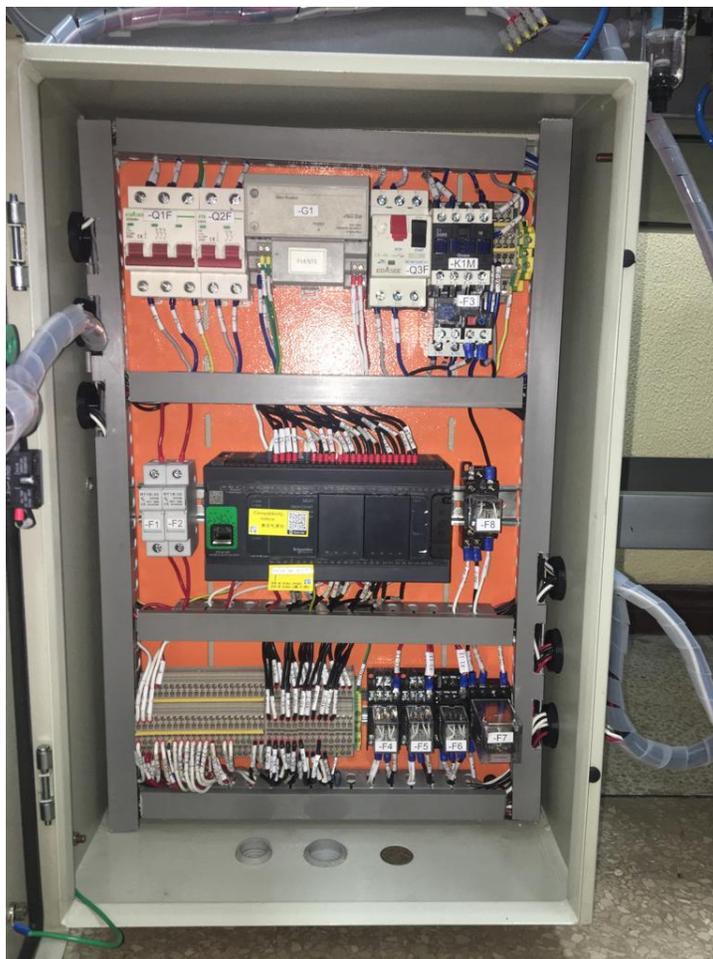
*Nota.* En la figura se presentan los tableros ubicados en el bastidor de la banda transportadora.

Por otra parte, para a posterior facilitar el mantenimiento del tablero se conectaron todas las entradas y salidas del PLC a un grupo de borneras de doble piso, excepto las entradas del PLC que se designaron para los pulsadores, selectores y luces indicadoras ubicadas en la puerta del gabinete.

Además, se añadió un breaker de 6A de dos polos para proteger la línea de control y dos portafusibles de 6A para proteger al PLC. Por tanto, el tablero de potencia y control implementado se muestra en la figura 99 y 100 (para mayor detalle ver apéndices 4 y 5).

### **Figura 99**

*Tablero de potencia y control implementado*



*Nota.* Tablero de potencia y control implementado.

**Figura 100**

*Tablero de potencia y control implementado. a) Vista interna del tablero. b) Vista externa del tablero.*



a)

b)

*Nota.* Tablero de potencia y control construido.

### **Implementación neumática**

Para definir la longitud de las mangueras que conectan los cilindros neumáticos con los reguladores de flujo y sus respectivas electroválvulas fue necesario en primer lugar establecer la ubicación de la unidad de mantenimiento y las electroválvulas.

Por lo que, se emplearon los siguientes componentes:

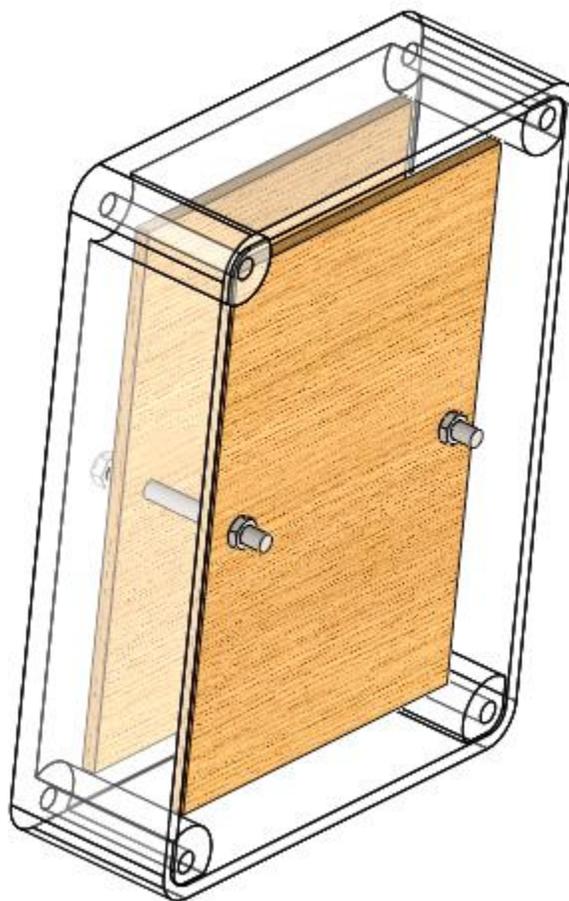
- Perfil tipo L de ASTM A36 de 2 pulgadas y 2 mm de espesor
- Gabinete plástico de 190x140x60 mm

Para una mejor distribución, se decidió ubicar las electroválvulas y el generador de vacío en un gabinete y sujetarlo al perfil tipo L junto con la unidad de mantenimiento (para mayor detalle ver

apéndice 3). Para lo cual fue necesario realizar en corte láser dos bases, cuya altura dependerá del ancho de las electroválvulas del primer piso y la posición de las tuercas que actuarán como topes para la base del segundo piso, como se muestra en la figura 101.

### Figura 101

*Modelo CAD de la caja de electroválvulas*



*Nota.* Caja de doble fondo para almacenar las electroválvulas.

De esta manera, se situarán en la parte frontal de la banda transportadora y se ensamblarán sobre el perfil tipo U del bastidor. La caja de electroválvulas implementada se muestra en la figura 102 y su montaje en la figura 103.

**Figura 102**

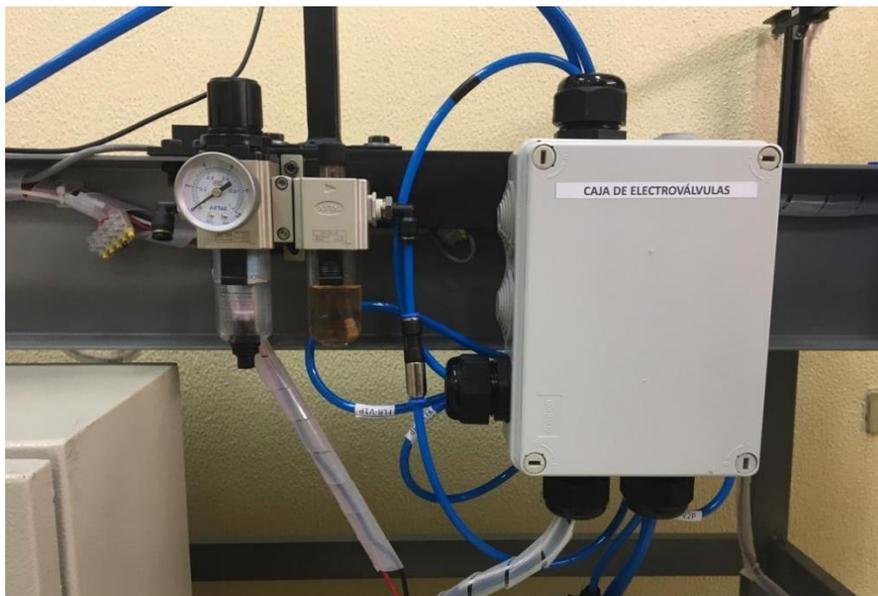
*Caja de electroválvulas acoplada al perfil L de A36*



*Nota.* Caja de electroválvulas implementada.

**Figura 103**

*Caja de electroválvulas y unidad de mantenimiento acopladas al bastidor de la banda transportadora*



*Nota.* Componentes neumáticos acoplados al bastidor de la banda transportadora.

Además, fue necesario emplear los siguientes componentes:

- Unión tipo T
- Dos uniones a 90°
- Unión tipo cruz
- Racores
- Silenciadores
- Teflón

En cuanto a la fuente de alimentación neumática se estableció el uso del compresor mostrado en la figura 104 disponible en el laboratorio.

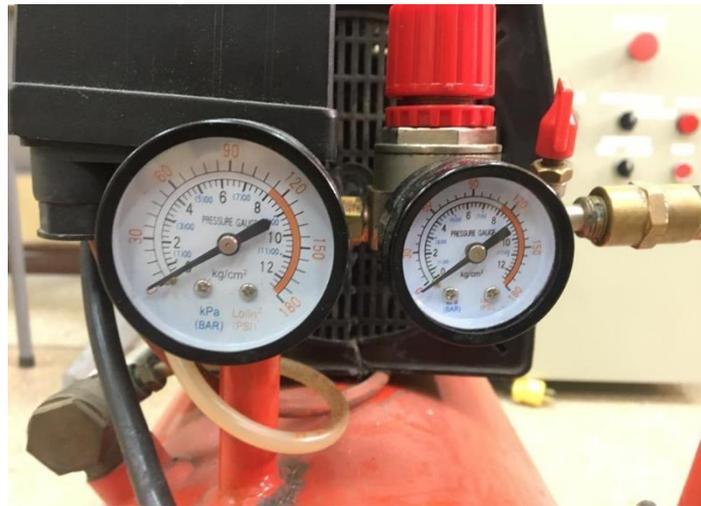
**Figura 104**

*Compresor empleado para la implementación neumática*



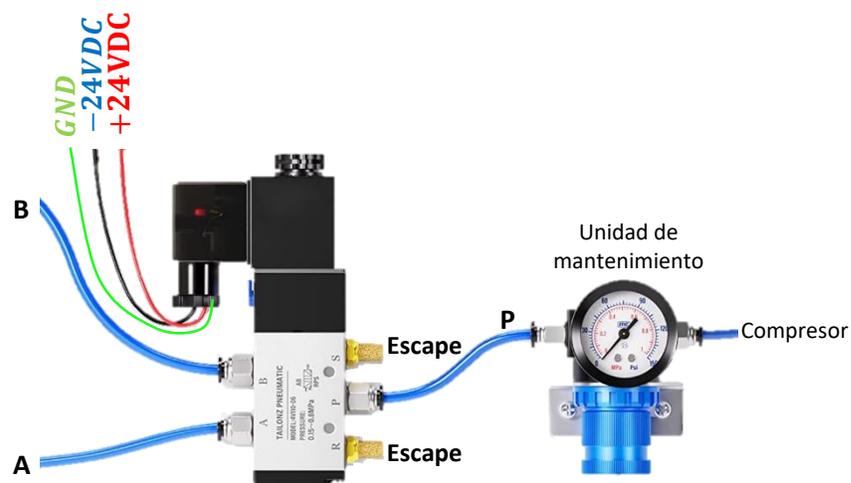
*Nota.* Compresor de 1 a 12 bares y alimentación de 110 VAC.

El compresor mostrado en la figura anterior no cuenta con una placa que muestre sus características técnicas. Sin embargo, en la figura 105 se muestra la presión máxima de trabajo del compresor, basado en sus manómetros.

**Figura 105***Manómetros del compresor*

*Nota.* Presión máxima y mínima que puede otorgar el compresor.

Por otra parte, como se mencionó en secciones anteriores las electroválvulas serán controladas por el PLC y a su vez estarán protegidas por unos relés. Por tanto, la conexión eléctrica necesaria para su correcto funcionamiento se muestra en la figura 106

**Figura 106***Esquema de las conexiones neumáticas y eléctricas de las electroválvulas*

*Nota.* En la figura se ejemplifica la conexión neumática y eléctrica de las electroválvulas.

### Control del motorreductor - Variador de frecuencia

Para el control del motorreductor se implementó un variador de frecuencia cuyas características debían estar acorde a las características del motorreductor adquirido las cuales se mencionan a continuación:

- a. Alimentación de entradas: 220V bifásica
- b. Tensión de salida: 220V trifásica
- c. Potencia: 0.5 HP

Se sometió a prueba el variador de frecuencia donado por la universidad cuyas características se mencionan a continuación:

- d. Alimentación de entrada: 220V monofásica
- e. Tensión de salida: 220V trifásica
- f. Potencia: 1 HP
- g. Tipo de Control: vectorial sin sensor

Debido a que el variador de frecuencia llevaba algunos años sin funcionar se debió realizar un encendido progresivo. Es decir, se energizó al variador durante dos horas y posteriormente se lo dejó sin alimentación por un lapso de 24 horas para finalmente ponerlo en funcionamiento continuo.

Además, se empleó una de las entradas del variador de frecuencia para controlar el encendido y apagado de la banda transportadora mediante el PLC.

Por otra parte, en cuanto al control del motor NEMA 23 se adquirió un driver **YS-DIV268N-5A** (ver figura 107) cuyas características se detallan a en la tabla 44:

**Figura 107***Driver YS-DIV268N-5A*

*Nota.* Imagen obtenida de: (ELECTROSTORE, n.d.)

**Tabla 44**

*Especificaciones técnicas del driver YS-DIV268N-5A*

Característica	Descripción
Voltaje de entrada	12 ... 42 V DC
Corriente de entrada	1 ... 5 A
Control de corriente	En 8 pasos de 0.2 a 5 A
Modo seleccionable de micro paso	1/1, 1/2, 1/4, 1/8 y 1/16 de paso
Tipo de protección	contra sobre voltaje, bajo voltaje, sobre corriente y cortocircuitos

*Nota.* Obtenida de: (ELECTROSTORE, n.d.)

Puesto que el variador y el driver necesitan ventilación debido a la gran cantidad de calor que se genera se implementó un ventilador en el tablero de control de los motores.

La implementación realizada en cuanto a los controladores de motores se muestra en la figura 108.

**Figura 108**

*Tablero de control de motores. a) vista exterior del tablero, b) vista interior del tablero*



a)



b)

*Nota.* Tablero para el control del motorreductor y el motor paso a paso.

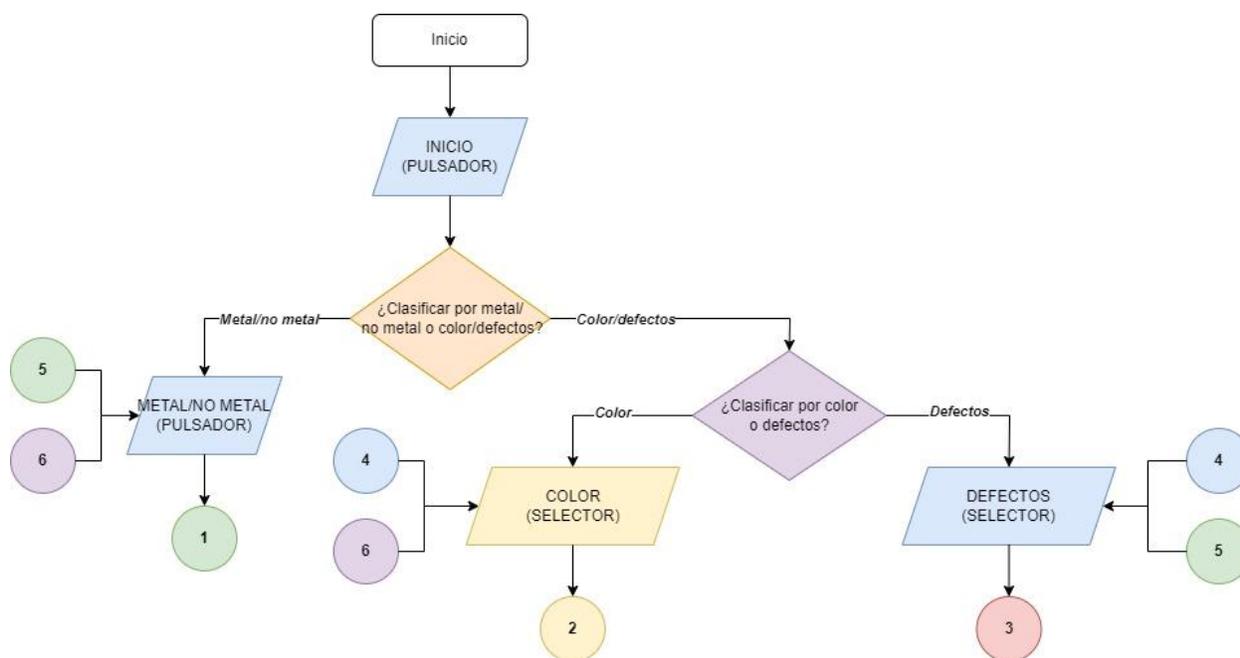
### Programación del PLC

La programación del PLC se realizó en el software **Machine Expert versión 2.1.1** que es proporcionado por Schneider Electric, el firmware disponible en aquel software para el **PLC Modicon TM241CE40T/U** es el **5.1.10.10**, por lo tanto, el mismo fue actualizado en el PLC con el **Software Update** de Schneider Electric en el momento de su adquisición, también se configuraron la dirección IP y máscara de red del PLC como **192.168.1.3** y **255.255.255.0** respectivamente. El tipo de programación que se decidió usar fue Ladder (Escalera), porque es fácil de entender y se pueden implementar todos los bloques de lógica booleana, temporizadores, conversores de unidades, contadores, módulos para los motores requeridos para el proyecto. La función del programa es la de procesar los datos de entrada para obtener la salida deseada y así poder realizar el proceso de clasificación deseado.

El diagrama de flujo de a continuación se dividió en partes, la parte de la figura 109 consiste en iniciar el proceso presionando el pulsador de inicio (color verde) y seleccionar el tipo de clasificación con los selectores. En las figuras 110, 111 y 112 la probeta se clasifica de acuerdo con lo indicado en la figura 109 y adicionalmente se puede cambiar el tipo de clasificación en pleno proceso mediante los selectores o terminar el proceso de clasificación con el pulsador de paro (color rojo) una vez se hayan clasificado todas las probetas que se hayan colocado en el subsistema de dosificación.

**Figura 109**

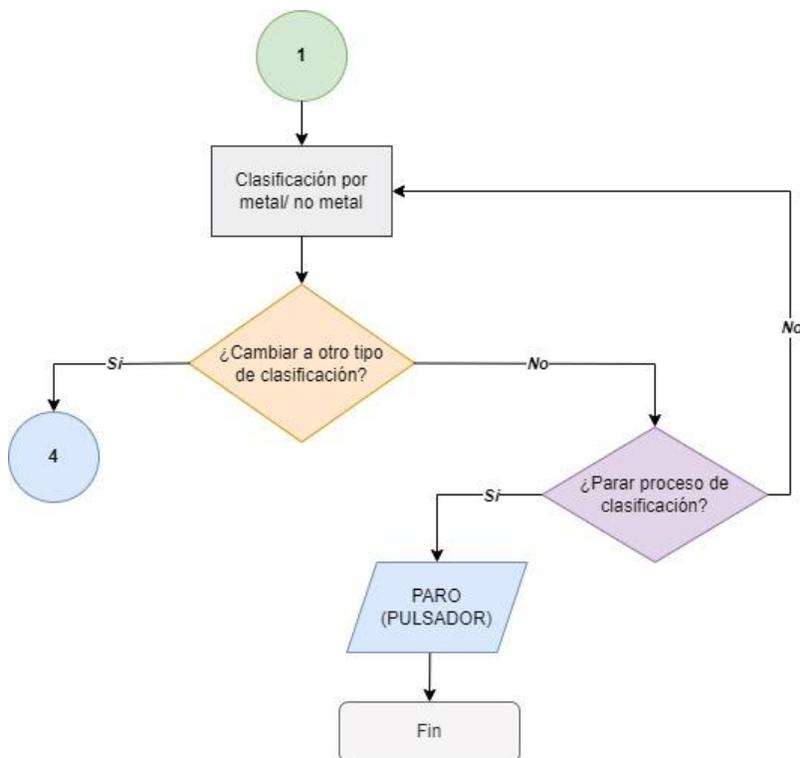
*Página 1 del diagrama de flujo del funcionamiento general*



*Nota.* En el diagrama de flujo de la figura se detalla lo siguiente: al pulsar “Inicio” se debe decidir el tipo de clasificación que se desea realizar. Si se desea cambiar de tipo de clasificación es necesario culminar el ciclo que este en proceso, de esta manera no se podrá clasificar si se preselecciona más de un tipo de discretización. De la misma manera, si se pulsa “Parar” el proceso se detendrá.

**Figura 110**

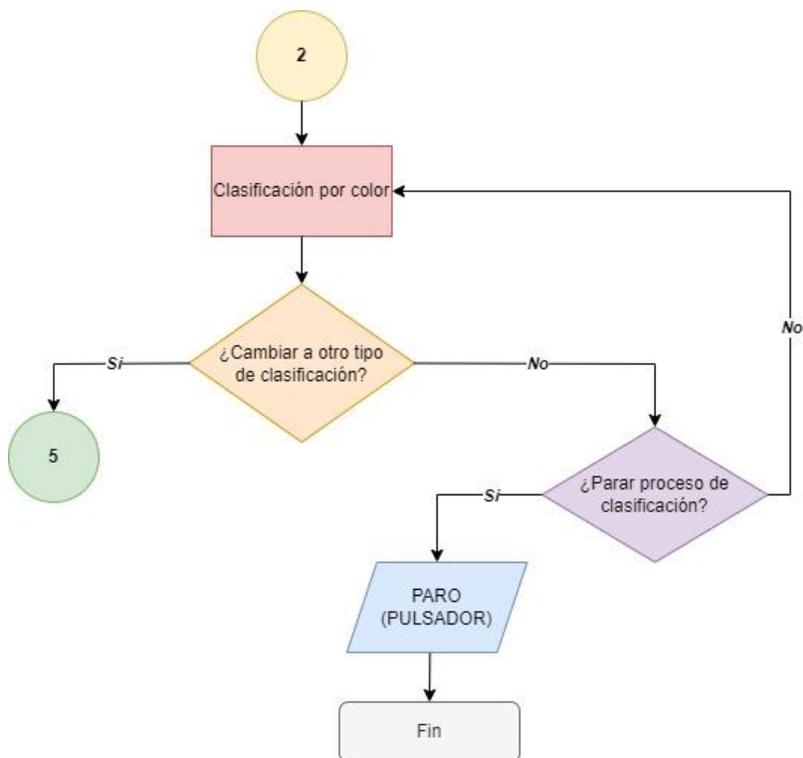
*Página 2 del diagrama de flujo del funcionamiento general*



*Nota.* En la figura se muestra el diagrama de flujo para cambiar el tipo de clasificación cuando se seleccionó la discretización según su naturaleza.

**Figura 111**

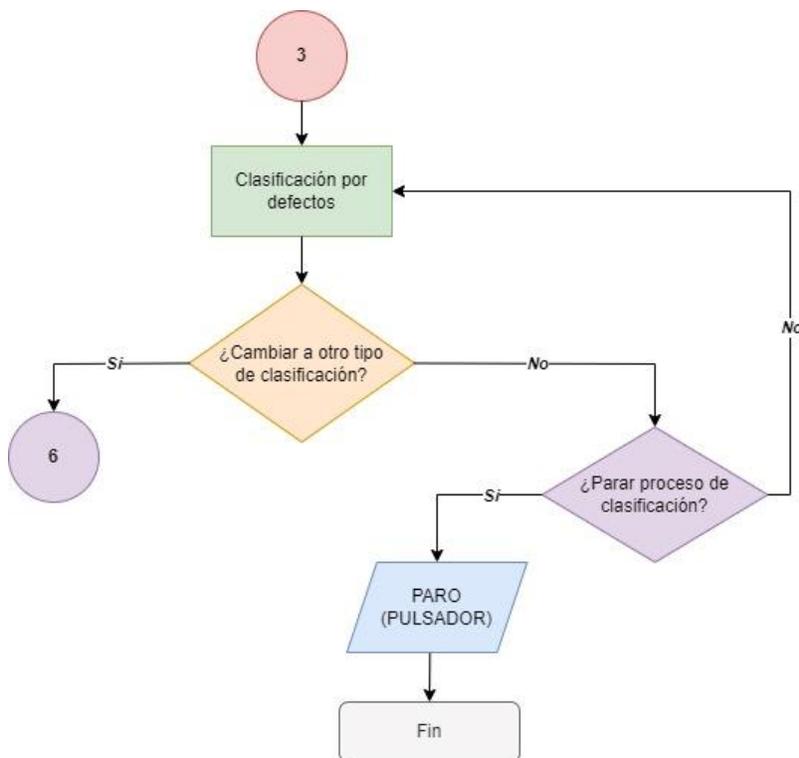
*Página 3 del diagrama de flujo del funcionamiento general*



*Nota.* En la figura se muestra el diagrama de flujo para cambiar el tipo de clasificación cuando se seleccionó la discretización según su color.

Figura 112

Página 4 del diagrama de flujo del funcionamiento general

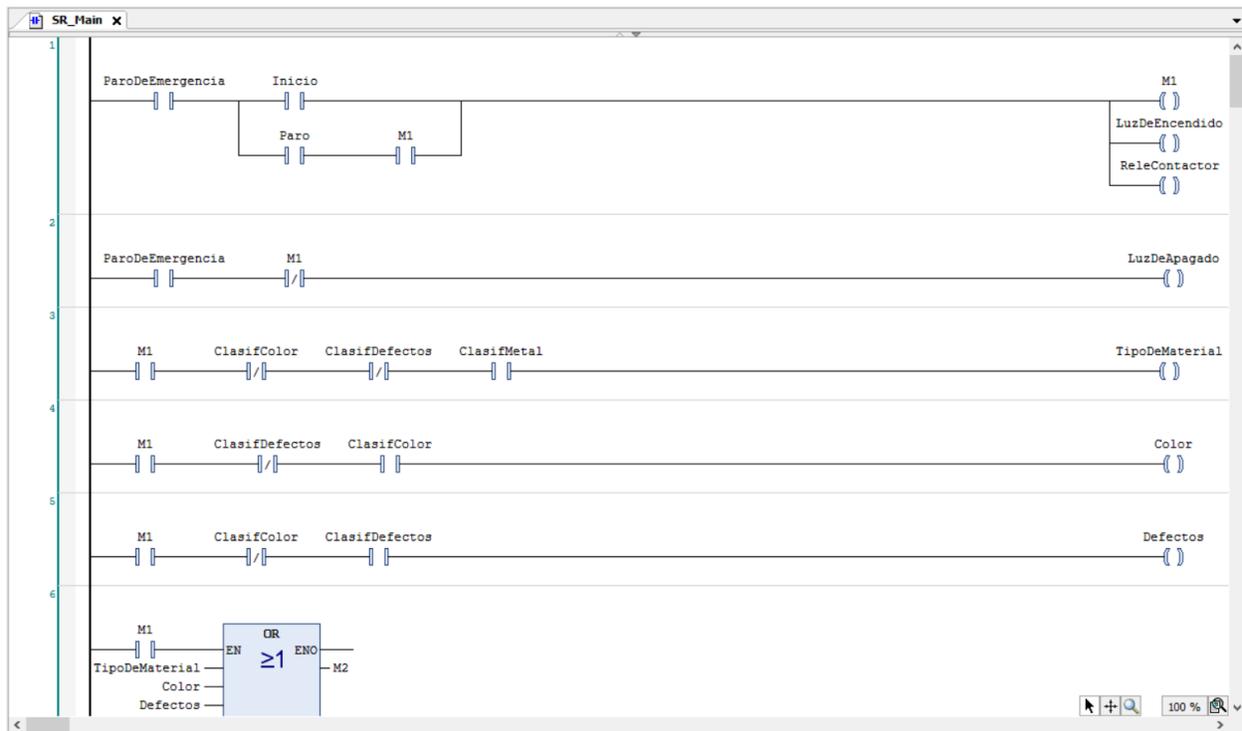


*Nota.* En la figura se muestra el diagrama de flujo para cambiar el tipo de clasificación cuando se seleccionó la discretización por sus defectos.

A parte de las entradas y salidas físicas que están conectadas al PLC, se crearon variables auxiliares y memorias del tipo booleanas como medidas de seguridad para la conexión, desconexión, selección de tipo de clasificación y para poder usarlas como bobinas que accionen contactos NA y NC. En la figura 113 se presenta una captura de pantalla de las primeras instrucciones en el archivo SR\_Main el cual se descarga y ejecuta en el PLC.

Figura 113

Primeras instrucciones de la programación Ladder en el SR\_Main



*Nota.* Programación Ladder.

Un ejemplo de cómo se utilizaron variables auxiliares es para seleccionar el tipo de clasificación que valga la redundancia se realiza con selectores del tablero, cada selector está asociado a una variable auxiliar (bobina), las mismas deben ser capaces de presentar restricciones entre sí, esto se logra mediante el uso de contactos NC para que solo sea posible fijar un tipo de clasificación a la vez.

El motor paso a paso se controló configurando dos salidas rápidas como PTO (Pulse Train Output) que es un pulso con un ciclo de trabajo constante y una frecuencia variable, la ventaja de usar este tipo de pulso es que es muy preciso y gracias a los bloques del software es fácil implementarlo para poner en marcha, para y cambiar el giro del motor, en la figura 114 se indica cual es la configuración del PTO, nótese que se colocó una velocidad de inicio y de paro del motor de 500 Hz y una aceleración de 1 Hz/ms. A parte de las salidas rápidas se usaron dos salidas normales para activar el bloque de encendido del PTO, en la figura 115 se muestran los bloques de POWER y STOP del motor paso a paso, y en la figura

116 se muestra uno de los bloques de movimiento del motor paso a paso en la dirección positiva o CW (Clockwise) donde se colocó una velocidad de 850 Hz.

**Figura 114**

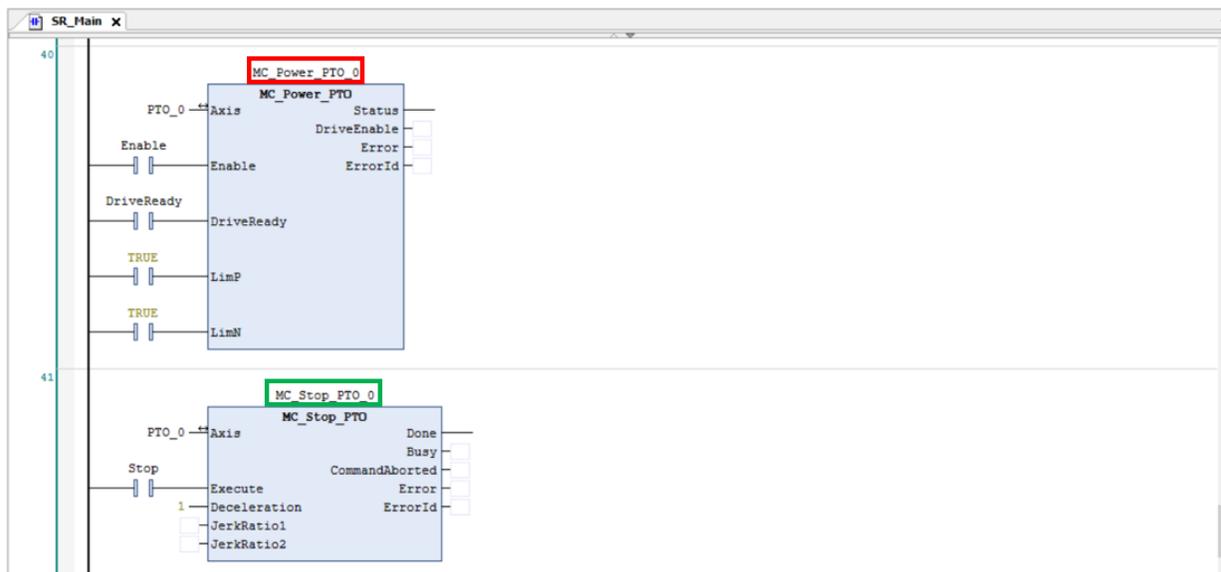
*Configuración del PTO para controlar el motor paso a paso*

Parameter	Type	Value	Default Value	Unit	Description
Pulse generation function	Enumeration of WORD	PTO	None		Select the pulse generation application
General					
Instance name	STRING	PTO_0	*		Name the Axis controlled by this PTO channel. It is used as input of the PT
Output Mode	Enumeration of BYTE	A Pulse / B Direction	A ClockWise / B CounterClockWise		Select the pulse output mode
A output location	Enumeration of SINT	Q0	Disabled		Select the PLC output used for the A signal
B output location	Enumeration of SINT	Q1	Disabled		Select the PLC output used for the B signal
Position Limits					
Software Limits					
Enable Software Limits	Enumeration of BYTE	Enabled	Enabled		Select whether or not to use the software limits
SW Low Limit	DINT(-2147483648...2147483646)	-2147483648	-2147483648		Set the software limit position to be detected in the negative direction
SW High Limit	DINT(-2147483647...2147483647)	2147483647	2147483647		Set the software limit position to be detected in the positive direction
Motion					
General					
Maximum Velocity	DWORD(0...100000)	100000	100000	Hz	Set the pulse output maximum velocity (in Hz)
Start Velocity	DWORD(0...100000)	500	0	Hz	Set the pulse output start velocity (in Hz). 0 if not used.
Stop Velocity	DWORD(0...100000)	500	0	Hz	Set the pulse output stop velocity (in Hz). 0 if not used.
Acc./Dec. Unit	Enumeration of BYTE	ms	Hz/ms		Set acceleration/deceleration as rates (Hz/ms) or as time constants from 0
Maximum Acceleration	DWORD(1...100000)	1	100000		Set the acceleration maximum value (in Acc./Dec. Unit)

*Nota.* Configuración de la función del PTO (tren de pulsos).

**Figura 115**

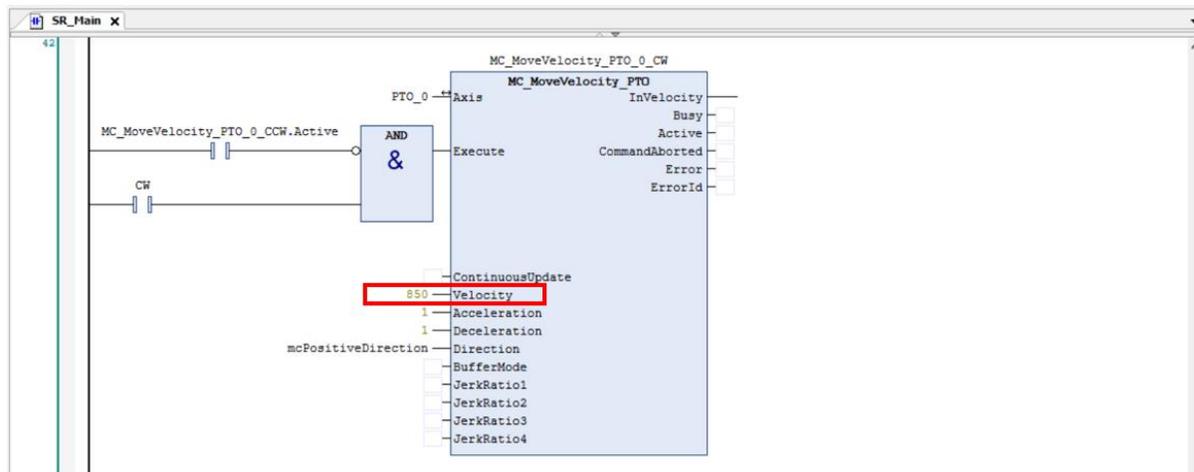
*Bloques de POWER y STOP*



*Nota.* Bloques para la configuración de la función del PTO para el control del motor a pasos.

Figura 116

Bloque de movimiento en la dirección positiva o CW(Clockwise)



*Nota.* Bloque responsable de elegir la dirección de giro del motor paso a paso.

El uso de temporizadores fue muy importante en el proyecto, ya que ha permitido realizar un óptimo procesamiento de las señales de entrada. Por ejemplo, a continuación, se presenta la figura 117, donde se puede apreciar que se usan un temporizador (TON\_3) con una variable asociada en su salida (timer 3), al activar cualquier sensor fin de carrera, los cuales también se usan para activar el bloque STOP del motor paso a paso, pasa 1 segundo para que se produzca la desactivación automática del bloque STOP y así poder reactivar algún bloque de movimiento para que no haya errores en los mismos.

**Figura 117**

*Activación y desactivación automática del bloque STOP usando un temporizador*



*Nota:* Sección de la programación responsable de la activación y desactivación del bloque PTO.

Otra aplicación importante de un temporizador se puede ver en la figura 118, el propósito del mismo es la de detener el carro justo en la posición del medio del clasificador, esto se realizó configurando el tiempo de 1.6199 segundos requerido para que el carro llegue al centro siempre y cuando no se alteren las velocidades del motor paso a paso ni la distancia a la que los sensores fin de carrera están colocados respecto a la mitad del clasificador.

**Figura 118**

*Temporizador para detener el carro justo en la mitad del clasificador*



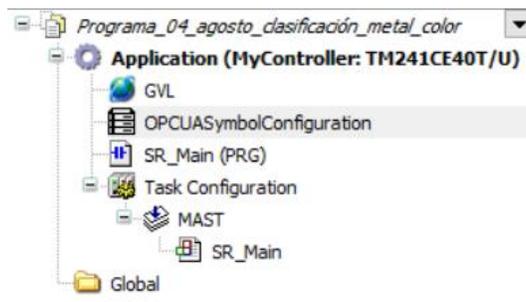
*Nota.* Sección de la programación encargada de ubicar el carrito sobre la pinza.

Finalmente se configuró el PLC como un servidor OPCUA, primero se añadió OPCUASymbolConfiguration, el cual, una vez creada esta instancia, aparece en el árbol de aplicaciones como se puede ver en la figura 119, en OPCUASymbolConfiguration se seleccionan las variables que se

van a conectar con el servidor OPCUA y se define si se desea realizar lectura, escritura o ambas en cada una de ellas como se indica en la figura 120.

**Figura 119**

*Árbol de aplicaciones del PLC*



*Nota.* Configuración del estado de las entradas del PLC para la comunicación mediante OPCUA.

**Figura 120**

*Variables que se conectaron al OPCUA y su modo de acceso lectura/escritura*

<input checked="" type="checkbox"/>	Vision	Bool	↕
<input type="checkbox"/>	Positivo	Bool	↕
<input checked="" type="checkbox"/>	Color	Bool	↕
<input checked="" type="checkbox"/>	Defectos	Bool	↕
<input checked="" type="checkbox"/>	DeteccionVision	Bool	↕
<input checked="" type="checkbox"/>	sesionInido	Int	↕
<input checked="" type="checkbox"/>	sesionFin	Int	↕
<input checked="" type="checkbox"/>	Reseteo	Bool	↕

*Nota.* Variables que se emplean para la comunicación cliente-servidor.

En la configuración de seguridad del OPCUA, el tipo de acceso que se configuró con usuario y contraseña, el puerto del servidor se dejó con el número predeterminado que en el presente caso es 4840 y el número de sesiones que soporta que se dejó en 2, ver figura 121. Una vez realizado este último paso ya se pueden conectar los clientes al servidor OPCUA.

**Figura 121**

*Configuración de seguridad del servidor OPCUA*

The screenshot displays the configuration interface for an OPCUA server, divided into several sections:

- Security settings:** A red box highlights the "Disable anonymous login" checkbox, which is currently unchecked. Below it, a blue information icon and text state: "User credentials are managed in the Users and groups tab: [Users and Groups](#)".
- Server configuration:**
  - A green box highlights the "Server port" dropdown menu, which is set to 4840.
  - Other settings include: "Max subscriptions per session" (20), "Max monitored items per subscription" (100), "Max number of sessions" (2, highlighted with a blue box), "Min publishing interval" (1000 ms), "Min KeepAlive interval" (500 ms), and "Identifier type" (Numeric).
- Diagnostic:** The "Enable trace" checkbox is checked, and the "All" dropdown menu is visible.
- Sampling rates (ms):** A window titled "Double-click to edit" is open, showing a list of sampling rates: 500, 1000, and 2000.
- A "Reset to default" button is located at the bottom right of the configuration area.

*Nota.* Configuración del protocolo OPCUA del PLC Modicon M241.

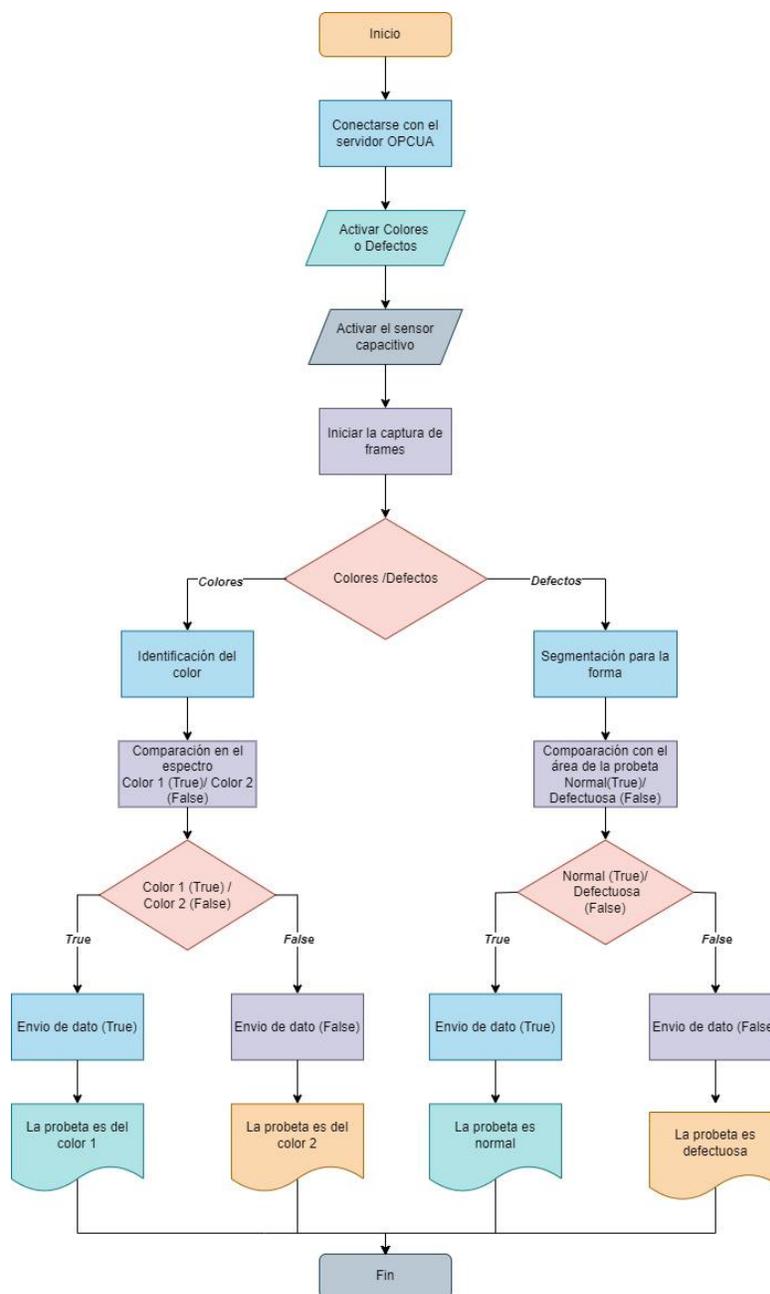
### **Programación del subsistema de reconocimiento**

El funcionamiento del subsistema de reconocimiento se presenta en el diagrama de flujo de la figura 122, el primer paso consiste en establecer la conexión entre el cliente y el servidor OPCUA, a continuación, se usa el selector de características visibles para decidir entre la clasificación por colores o por defectos, la captura de los frames inicia una vez que la probeta haya activado el sensor capacitivo del subsistema de reconocimiento. Las variables asociadas a estos eventos fueron leídas por el cliente para elegir e iniciar el tipo de clasificación requerida. Después de que se haya realizado el procesamiento de las imágenes, se escribió un valor booleano en una variable asociada al cambio de

giro del motor paso a paso en el servidor OPCUA, de esta manera la probeta fue depositada en el recipiente correspondiente. Para lograr aquel funcionamiento, el algoritmo se organizó en un conjunto de funciones con un único ciclo main, lo que facilita en gran medida el desarrollo del código por partes.

**Figura 122**

*Diagrama de flujo del subsistema de reconocimiento*



*Nota.* Secuencia funcional del algoritmo para la identificación de colores y defectos.

Para empezar, se tuvo como punto de partida la instalación de los paquetes en el IDE que para el presente caso fue **PyCharm Community Edition 2023.1** y se trabajó con **Python 3.8**. El primer paquete es **opencv-python** dicho paquete es el que tiene las herramientas necesarias para usar visión artificial, el segundo paquete es **numpy**, que es necesario para realizar operaciones matemáticas entre matrices que sirven para procesar las imágenes, el tercer paquete es **opcua**, el cual es sirve para establecer la comunicación entre el cliente (computadora personal) y el servidor (PLC) y permite la lectura y escritura de datos en las variables conectadas al servidor OPCUA desde el cliente, y por último **keyboard**, el mismo es útil para leer números o caracteres escritos mediante el teclado en la consola del IDE.

### **Importación de librerías**

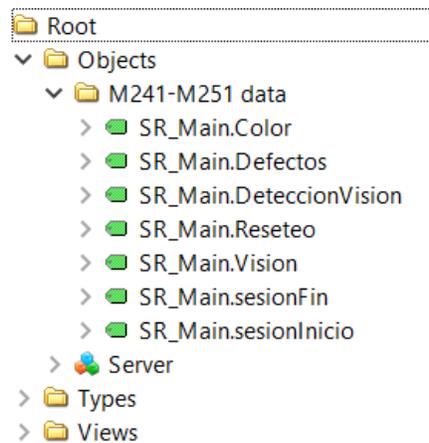
Una vez definidos los paquetes que se van a utilizar es necesario importar las librerías lo que se hace con las siguientes líneas de código: **from opcua import Client, ua**, no es necesario importar toda la librería de OPCUA sino solo las clases **Client** para configurar la computadora personal como cliente y **ua** para obtener las características de las variables, **import cv2** que importa la librería de Open CV, **import numpy as np** que importa el paquete que sirve para realizar operaciones matemáticas con matrices y vectores y **import keyboard** que permite leer el teclado mediante la consola.

### **Definición de las variables y directorio del OPCUA**

Para conocer las variables conectadas al OPCUA y el directorio al cual hay que acceder para lectura o escritura de las mismas, se utilizó el software **Unified Automation UaExpert** que es un cliente que permite ver cómo está organizado el servidor OPCUA. El path del directorio raíz se define igual como se muestra en la figura 123, mientras que las variables se acceden usando el Display Name de las mismas mostrado en la figura 124.

**Figura 123**

Directorio raíz del servidor OPCUA



*Nota.* Variables seleccionadas para la comunicación e intercambio de datos con el cliente.

**Figura 124**

Acceso de datos del servidor OPCUA

#	Server	Node Id	Display Name	Value	Datatype	urce Timestar	rver Timestan	Statuscode
1	UaServerC@	NS2 Numeric 397373146	SR_Main.Color	false	Boolean	20:37:29.690	20:37:29.690	Good
2	UaServerC@	NS2 Numeric 3903029929	SR_Main.Defectos	false	Boolean	20:37:29.690	20:37:29.690	Good
3	UaServerC@	NS2 Numeric 264205973	SR_Main.DeteccionVision	false	Boolean	20:37:29.690	20:37:29.690	Good
4	UaServerC@	NS2 Numeric 102922290	SR_Main.sesionInicio	0	Int16	20:37:29.690	20:37:29.690	Good
5	UaServerC@	NS2 Numeric 1887041494	SR_Main.sesionFin	0	Int16	20:37:29.690	20:37:29.690	Good
6	UaServerC@	NS2 Numeric 4259888599	SR_Main.Reseteo	false	Boolean	20:37:29.691	20:37:29.691	Good

*Nota.* Id de los nodos que activarán y llevarán la información al cliente o servidor.

### Conexión entre el cliente y el servidor OPCUA

La programación del OPCUA consiste en crear el cliente, para lo cual primero se definió el url del servidor que es **"opc.tcp://Administrator:modicon241@192.168.1.3:4840"**, nótese que el url está compuesto del usuario, ":" , la contraseña, "@", la dirección IP del PLC, ":" y el puerto del servidor. Se van a crear dos instancias una cliente y otros objetos, es importante definir las instancias cliente y objeto como variables globales para así poder utilizarlas en otras funciones y en el main mediante los comandos **global cliente** y **global objetos**.

El cliente se crea mediante el siguiente las siguientes líneas de código **url =**

**"opc.tcp://Administrator:modicon241@192.168.1.3:4840"** donde se define el url, **cliente=Client(url)**

que crea configura al computador personal como cliente del servidor opcua y **cliente.connect()** que sirve para establecer la conexión con el servidor. La variable objetos es el nodo raíz, el cual sirve para acceder al directorio donde están las variables conectadas al servidor OPCUA con el comando **objetos =**

**cliente.get\_root\_node()**

### **Cierre de sesión**

Un aspecto muy importante para tener en cuenta es que el número de sesiones máximo del servidor OPCUA es de 2, entonces si por algún caso no se cierra alguna sesión que haya sido creada, el servidor OPCUA se puede saturar de sesiones, entonces para no tener ese problema siempre hay que cerrar la sesión desde el cliente, eso se hace usando la siguiente línea de código: **cliente.close\_session()**:

### **Lectura de variables**

Para leer las variables (nodos) se han implementado funciones que realizan los siguientes pasos, primero se debe configurar el path de la variable requerida que consiste en el String del directorio raíz seguido del carácter "2:", y por último con del Display Name. Después se usó la instancia objetos (nodo raíz) para acceder a la variable requerida. Y para leer el valor de la variable se usa la instrucción **get\_value()**, los comandos que se utilizaron específicamente fueron los siguientes líneas de código: **def**

**checksensorecaprecon():** crea la función de lectura de una variable, **plcVarPath[len(plcVarPath)-1] = str("2:") + str(DeteccionVision)** generar el Sting que representa la dirección de una determinada variable de lectura, **var\_path = objetos.get\_child(plcVarPath)** crea el path de la variable de lectura, **valor = var\_path.get\_value()** lee el valor de la variable y **return valor** define el valor de la variable como salida de la función.

### **Escritura de variables**

La escritura de variables (nodos) tiene el mismo principio que la lectura que es configurar el path a diferencia que se usa la instrucción **set\_value()**, junto con **ua.DataValue**, **ua.Variant** y **ua.**

**VariantType.Boolean** que sirven para indicarle a la instrucción **set\_value()** el valor y tipo de dato que se

debe escribir, a continuación, se explican las líneas de código para escribir el valor en una variable: **def escribirvision(val):** crea la función de escritura en una variable, **plcVarPath[len(plcVarPath) - 1] = str("2:") + str(Vision)** generar el Sting que representa la dirección de una determinada variable de escritura, **var\_path = objetos.get\_child(plcVarPath)**, crea el path de la variable de escritura, **valor = var\_path.set\_value(ua.DataValue(ua.Variant(val,ua.VariantType.Boolean)))** escribe el tipo de valor y lo escribe en la variable, **return valor** define el valor de la variable como salida de la función.

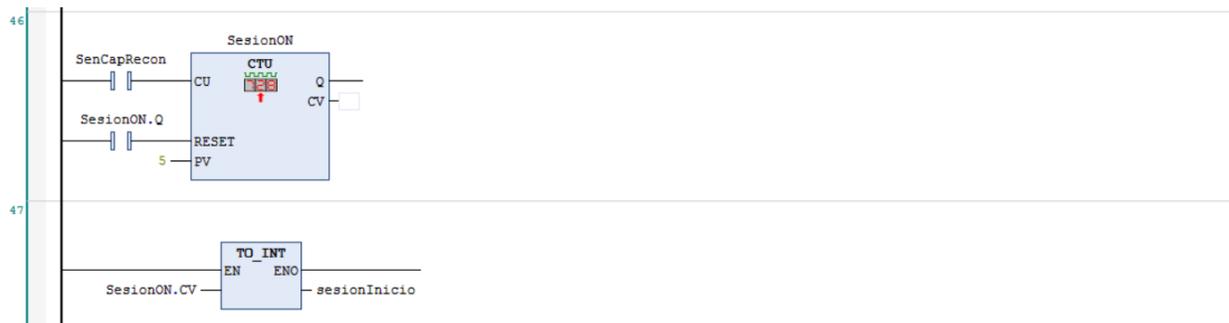
### Programación basada en eventos

Para sincronizar correctamente el PLC con el Cliente se utiliza la programación basada en eventos, la misma es necesaria debido a que la ejecución del Script de Python es mucho más rápida que la del PLC, en caso de que no se sincronicen, la memoria del PLC se podría saturar. El principio de la programación basada en eventos es que las funciones de escritura y lectura del Script de Python se ejecuten una sola vez a partir de un evento en particular.

Una forma práctica de realizar la programación basada en eventos es usar contadores ya que los valores de los mismos se actualizan una sola vez por ciclo, en la figura 125 se muestra uno de los contadores específicamente el que cuenta las veces que se activa el sensor capacitivo del subsistema de reconocimiento, el valor que se actualiza en el contador es CV que es de tipo Word entonces a continuación se lo transforma a Int para ser leído por el cliente.

**Figura 125**

*Contadores para la programación basada en eventos*

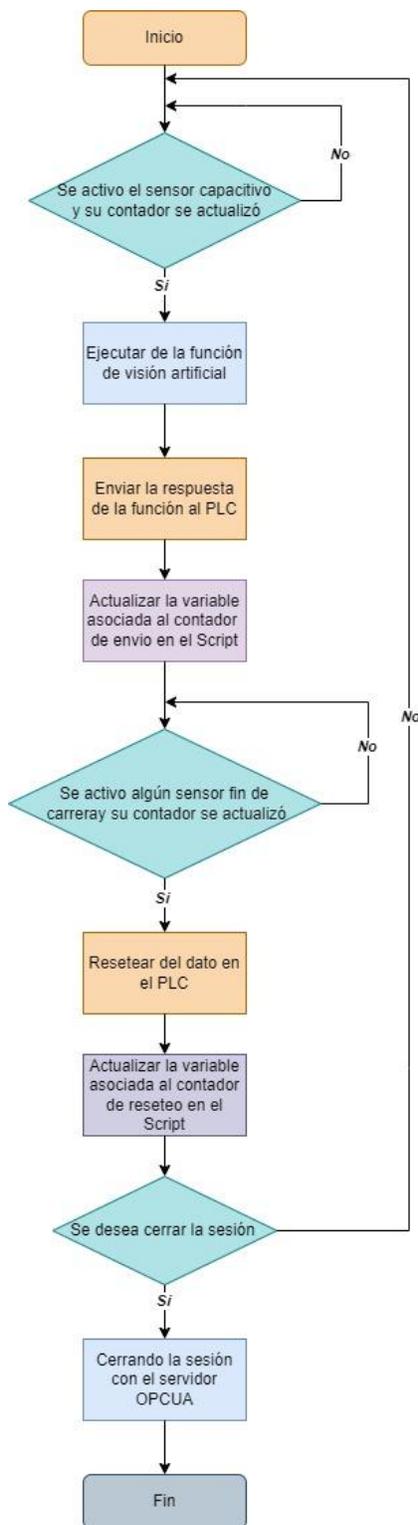


*Nota.* Programación basada en eventos mediante el uso de contadores.

Las funciones de visión artificial y la de escritura en la variable Vision, que es una de las variables que controla la dirección en que se moverá del motor paso a paso en la programación del PLC, deben ejecutarse una sola vez por ciclo, el contador que va a permitir que aquellas funciones se ejecuten es SesionON, como ya se mencionó ese contador cuenta las veces que se activa el sensor capacitivo del subsistema de reconocimiento, mientras que para resetear la variable Vision a su condición inicial, se usa el contador SesionOFF, el mismo cuenta la activación de cualquier final de carrera. La programación basada en eventos del presente proyecto se puede entender mediante el diagrama de flujo de la figura 126 donde al inicio se tiene que activar el sensor capacitivo del subsistema de reconocimiento para que el contador SesionON cuente y actualice su valor, a continuación se ejecuta la función de visión artificial que entrega una respuesta booleana que inmediatamente es escrita al valor Vision una sola vez, después de eso se actualiza el valor de la variable asociada al contador SesionON en el Script para poderla comparar con el valor de su contador para ejecutar un nuevo ciclo, si el valor de la variable Vision es True el motor paso a paso moverá el carro a la derecha, caso contrario el carro será movido a la izquierda, por lo cual para iniciar correctamente un nuevo ciclo, por eso es necesario resetear el valor de la variable Vision a False, aquella acción se realiza utilizando cualquier sensor fin de carrera, si el sensor se activa se escribe el valor de False en la variable visión una sola vez y posteriormente se actualiza el valor de la variable asociada al contador SesionOFF en el Script para poderla comparar con el valor de su contador en un nuevo ciclo. A parte si se desea cerrar la sesión así poder finalizar de manera segura la ejecución del Script de Python lo que se debe hacer es presionar “c”.

Figura 126

Diagrama de flujo de la función main



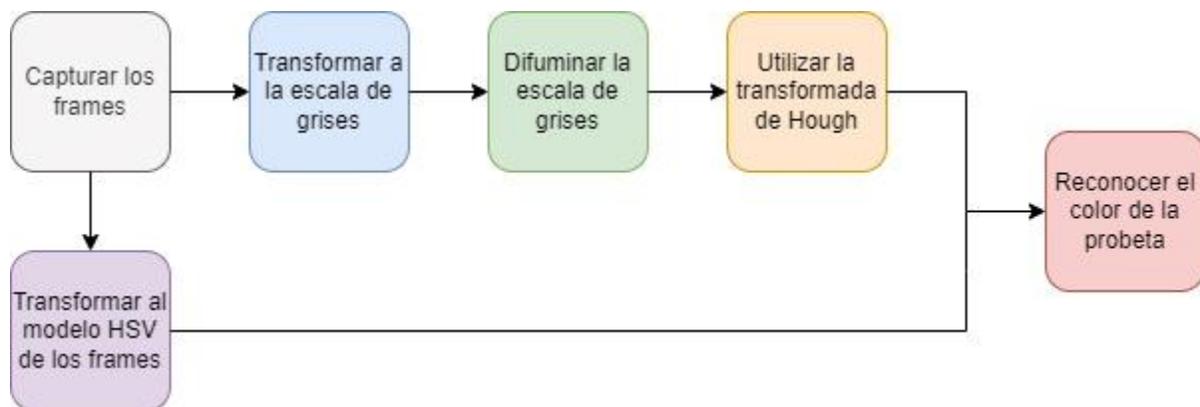
Nota. Diagrama de flujo de la función main.

### Clasificación por colores

La clasificación por color de la probeta se compone de dos hitos principales que son: primero reconocer la forma de la probeta y segundo identificar el color del píxel de interés, en la figura 127 se puede ver cuál es el proceso de clasificación por color, a continuación, se van a describir a mayor detalle cómo se usó Open CV para el presente caso.

**Figura 127**

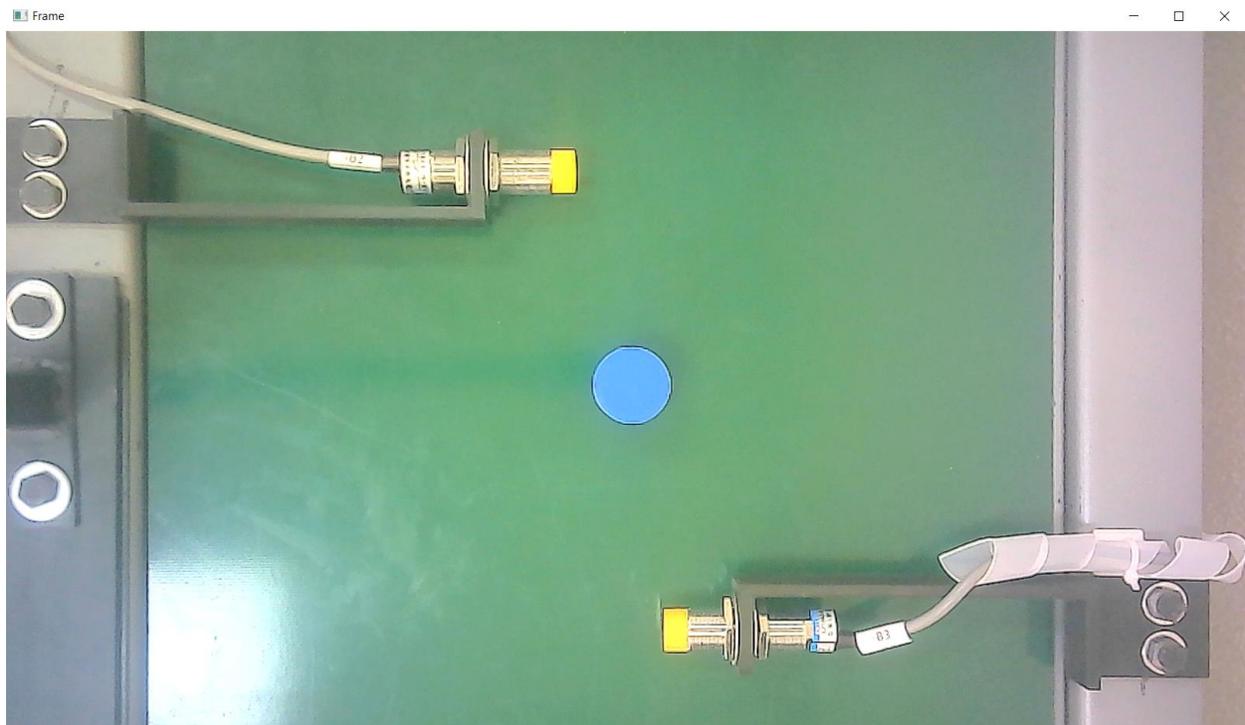
*Pasos para clasificar las probetas por colores*



*Nota.* Procesamiento de la imagen para la identificación de colores.

La captura de los frames se realiza con el comando `cap = cv2.VideoCapture(0)` que genera una instancia asociada a la cámara web para crear el video captura que se muestra en la figura 128, el índice del paréntesis representa la ubicación en un vector de las cámaras web conectadas a la computadora personal, aquel índice puede cambiar por lo que hay que revisar que coincida con el de la cámara web del subsistema de reconocimiento antes de cada uso.

Un frame es una imagen por lo que para representarlos como un video hay que colocar la siguiente línea de código dentro de un bucle while: `ret, frame = cap.read()` el cual entrega `ret` que es valor booleano que es igual a True cuando se haya realizado correctamente una captura y `frame` que es la imagen en sí.

**Figura 128***Imagen obtenida del video captura*

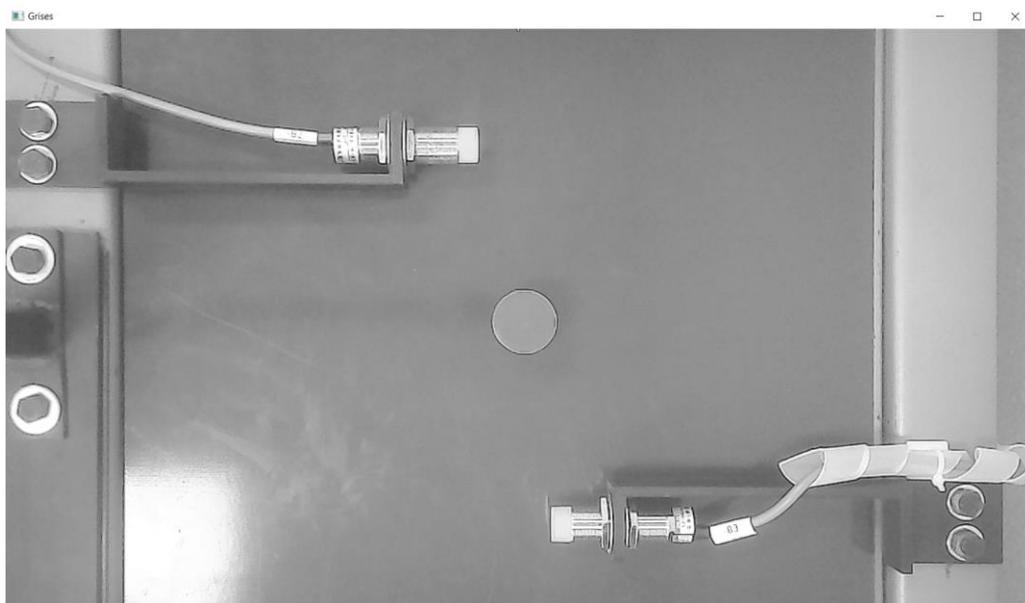
*Nota.* Captura de la imagen a procesarse.

Una vez creada el video captura los frames que vienen en BGR se utiliza la línea de código **gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR\_BGR2GRAY)** para transformar a la escala de grises como se puede apreciar en la figura 129. Por otro lado, se usa la línea de código **hsv\_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR\_BGR2HSV)** para transformar a HSV como se muestra en la figura 130.

El siguiente paso consistió en difuminar la escala de grises, esto se realiza para reducir el ruido en la imagen y así no tener falsos positivos en la detección de círculos, ver la figura 131, se utilizó el siguiente comando **GaussianBlur** que consiste en convolucionar la imagen de entrada utilizando un kernel Gaussiano específico, el kernel usado fue de 9x9 con un valor de la desviación sigma igual a 0, la línea de código quedó como: **blur = cv2.GaussianBlur(gray, (9, 9), 0)**.

**Figura 129**

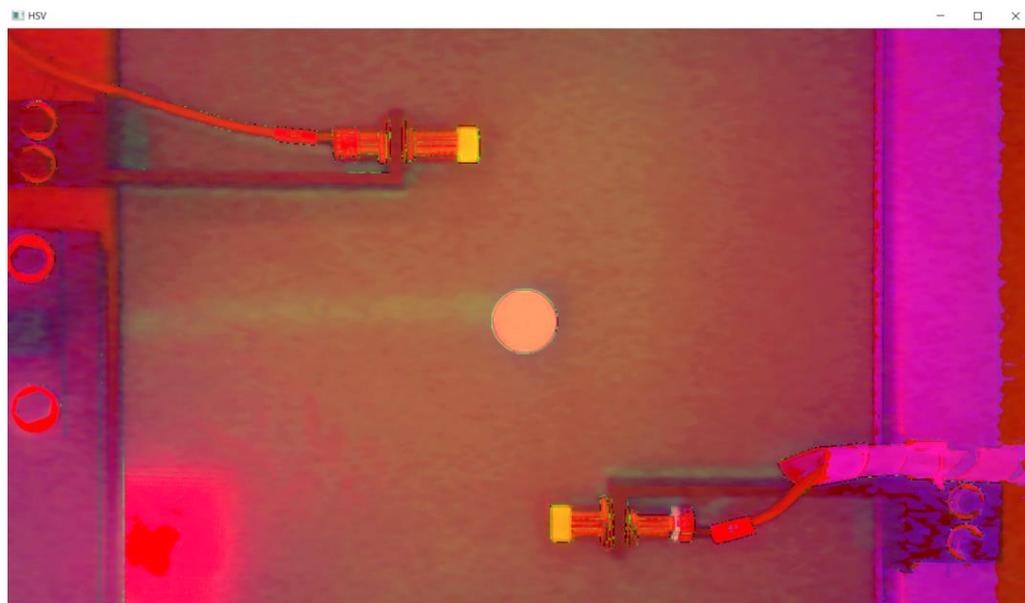
*Imagen transformada a la escala de grises*



*Nota.* Imagen en escala de grises.

**Figura 130**

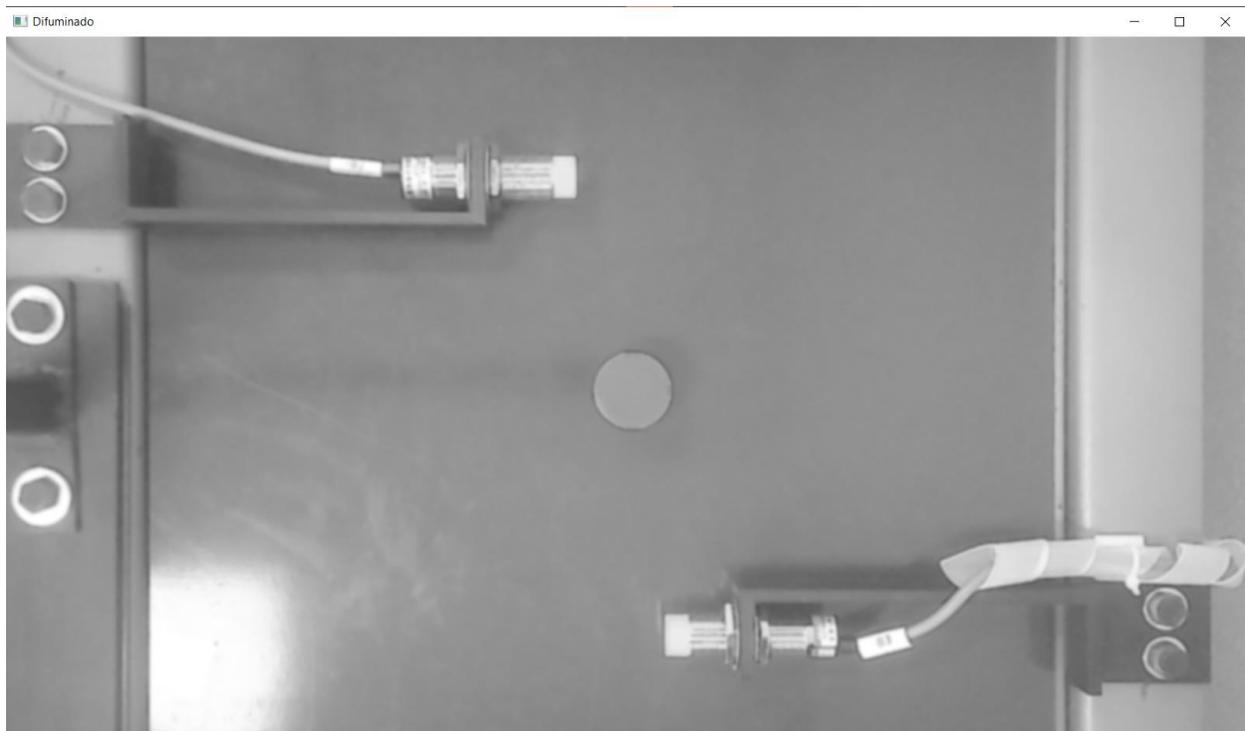
*Imagen obtenida en HSV*



*Nota.* Imagen en escala HSV.

**Figura 131**

*Escala de grises difuminada utilizando GaussianBlur*



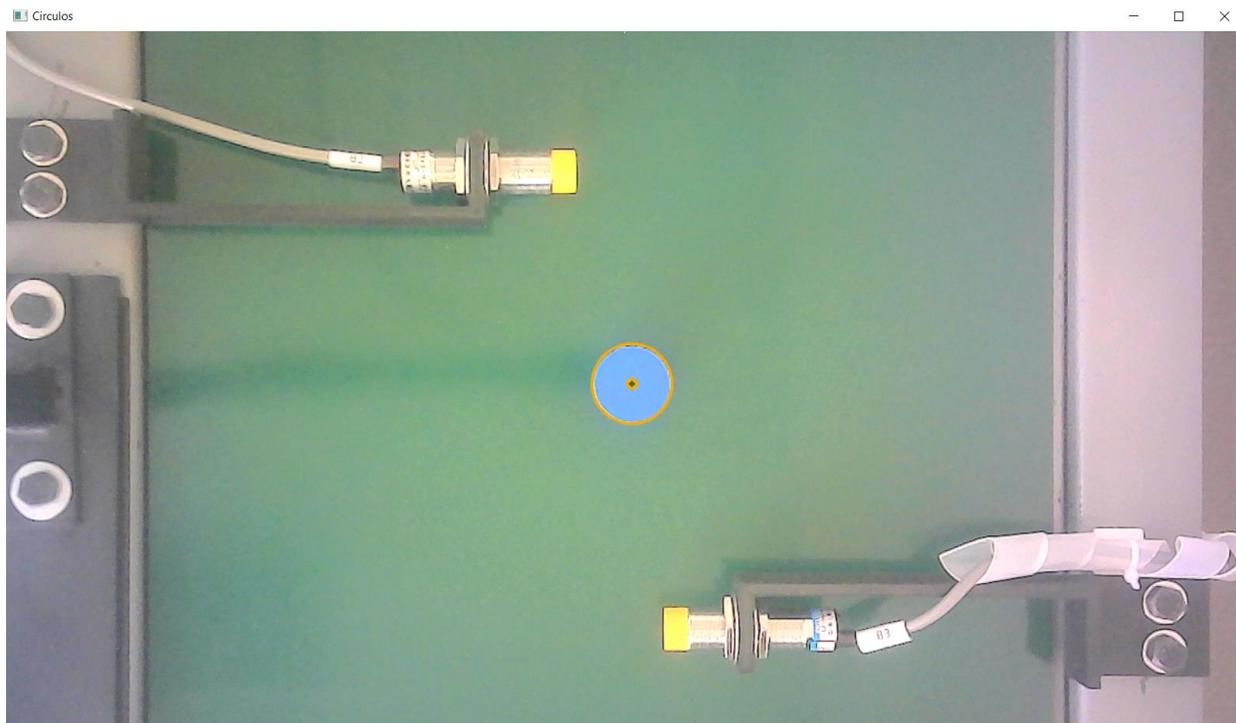
*Nota.* Imagen en escala de grises difuminada.

Con la imagen en escala de grises difuminada ya se puede utilizar la transformada de Hough sirve para encontrar círculos en una imagen en escala de grises. La transformada de Hough de Open CV tiene los siguientes parámetros, primero la imagen de entrada, un método que consiste en el gradiente de información de los bordes mejor conocido como `cv2.HOUGH_GRADIENT`, un valor escalar **dp** es el inverso del ratio de la resolución del acumulador a la resolución de la imagen cuyo rango se encuentra entre 1 y 1.4, la **distancia mínima** entre los centros de los círculos que se va a identificar, un **parámetro 1** que es el límite superior de la detección de bordes mediante el método Canny, un **parámetro 2** que es valor del acumulador de la umbralización para el método `cv2.HOUGH_GRADIENT`, un **radio mínimo** de los círculos que se van a identificar en píxeles y un **radio máximo** de los círculos que se van a identificar en píxeles La línea de código para hallar a la probeta a manera de círculo usando la transformada de Hough fue: `circulos = cv2.HoughCircles(blur, cv2.HOUGH_GRADIENT, 1.4, 100, param1=50, param2=35,`

***minRadius=40, maxRadius=45***). Los resultados de la utilización de la transformada de Hough se presentan en la figura 132.

### Figura 132

*Resultado de la aplicación de la transformada de Hough*

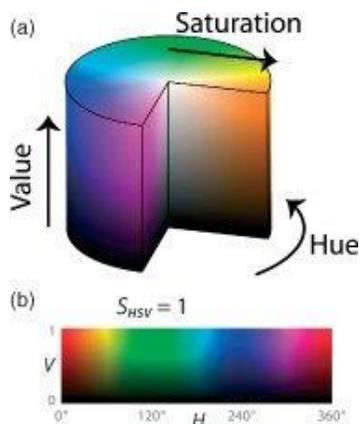


*Nota.* Imagen difuminada.

Para encontrar el color de la probeta se usa el frame en HSV, la ventaja de usar el modelo HSV es que solo se requiere un canal para filtrar los colores, específicamente el canal que se va a analizar es el Hue que tiene una escala para el espectro electromagnético visible como se puede ver en la figura 133.

**Figura 133**

*Conceptualización del Modelo HSV*

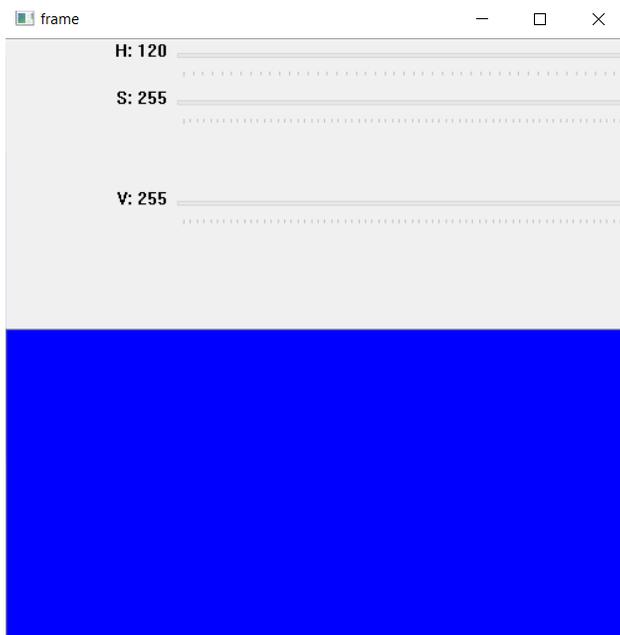


*Nota.* Obtenido de: (Peeters, 2013)

Entonces para poder filtrar el color se debe establecer el rango de valores para dicho color en el canal Hue, se utilizó un Script libre llamado *hsv\_color\_picker* que muestra el color en HSV junto con sliders para cada uno de sus canales, una captura del mismo se presenta en la figura 134.

**Figura 134**

*Color en HSV con sliders para sus canales*



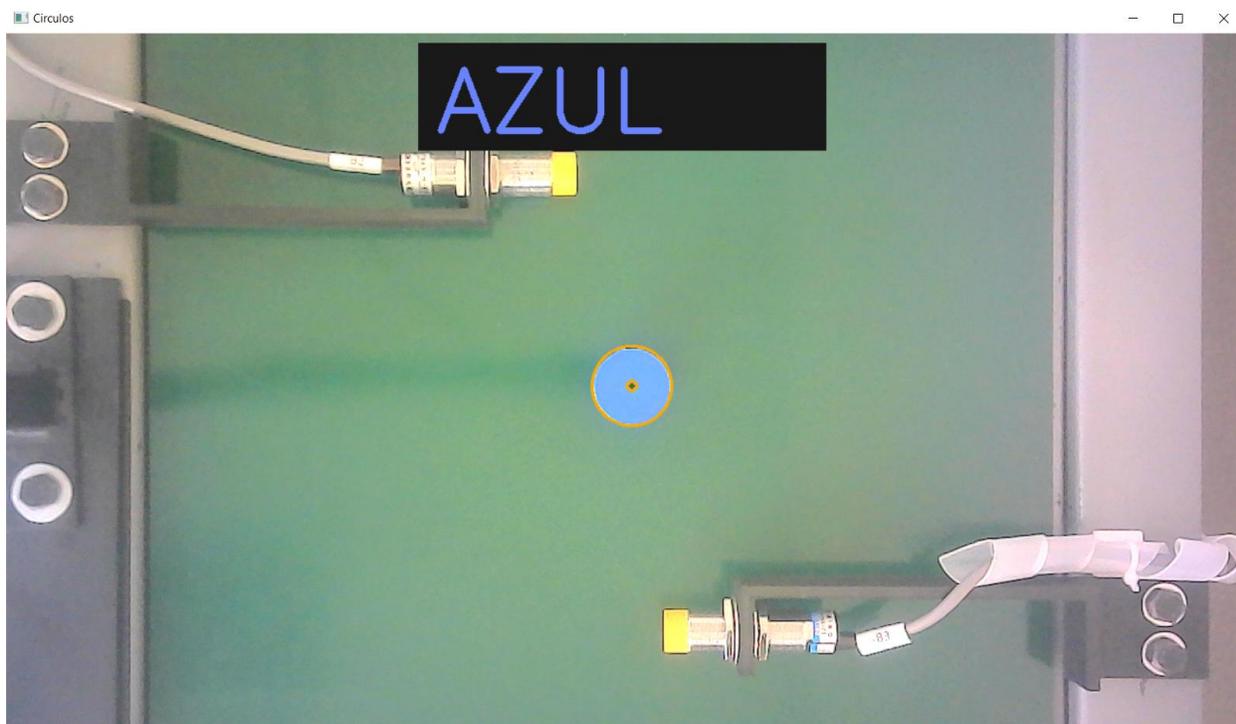
*Nota.* Obtenido de: (Canu, 2021)

La cuestión final para poder clasificar la probeta por colores es juntar la parte de detección de la misma (mediante la detección de un círculo) con el filtro de color (rango de valores en el canal Hue), entonces la idea es reconocer exclusivamente el color de la probeta, esto se realiza extrayendo las coordenadas de la probeta (círculo detectado), y analizando dichas coordenadas en el frame en HSV. La operación se realizó con las siguientes líneas de código: `cx = elegido[0]` extrae la coordenada en x de la probeta, `cy = elegido[1]` extrae la coordenada en y de la probeta, `pixel_center = hsv_frame[cy, cx]` que ubican en la imagen en HSV el centro de la probeta y `hue_value = pixel_center[0]` para definir el canal que se va a analizar en la probeta de la imagen HSV

El resultado de la detección de los colores de las probetas se muestra en la figura 135 y 136 para el proyecto se busca escribir un valor de True en la variable Vision si la probeta es de color azul, en cambio sí es de color Violeta se escribe un valor de False.

**Figura 135**

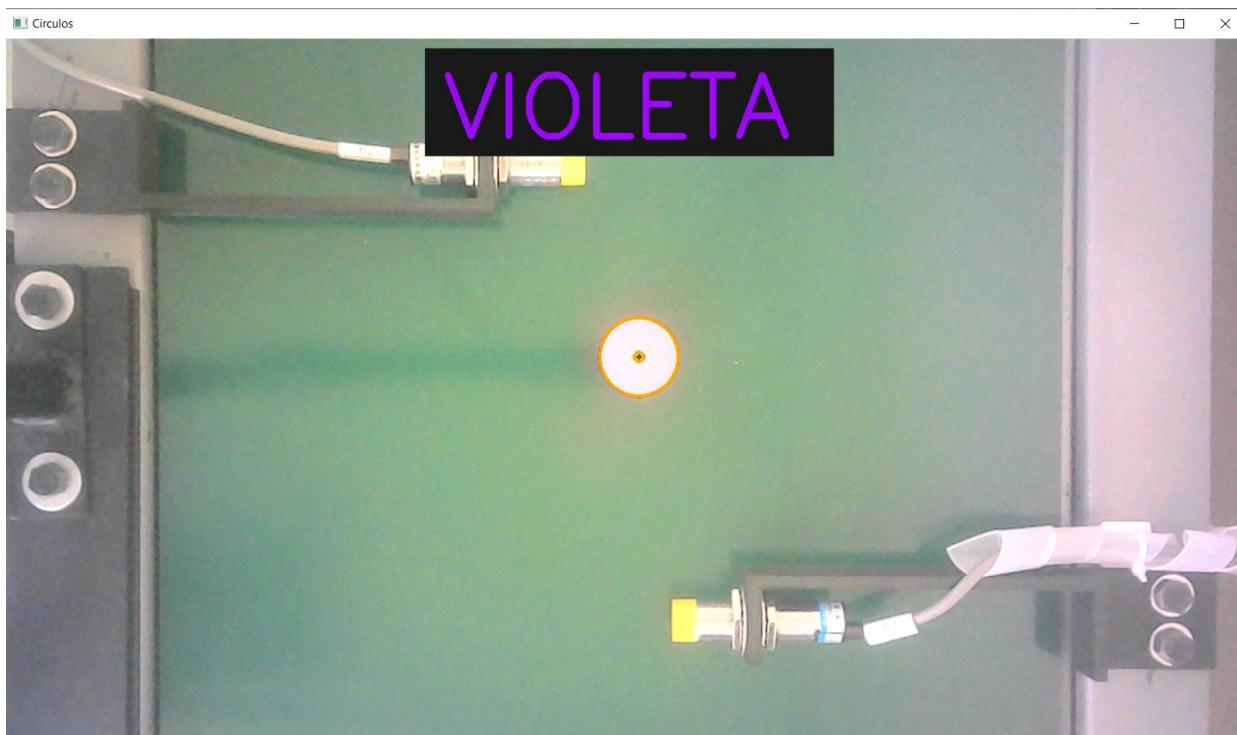
*Detección del color azul en la probeta*



*Nota.* Color detectado.

**Figura 136**

*Detección del color violeta en la probeta*



*Nota.* Probeta de color violeta detectada.

### ***Clasificación por defectos***

La clasificación por defectos consiste en dos hitos, en primer lugar, encontrar la probeta, eso se realiza igual que en la clasificación por color, y, en segundo lugar, reconocer el contorno de la probeta para calcular su área. El orden de los pasos a seguir se muestra en la figura 137.

**Figura 137**

*Pasos para clasificar las probetas por defectos*



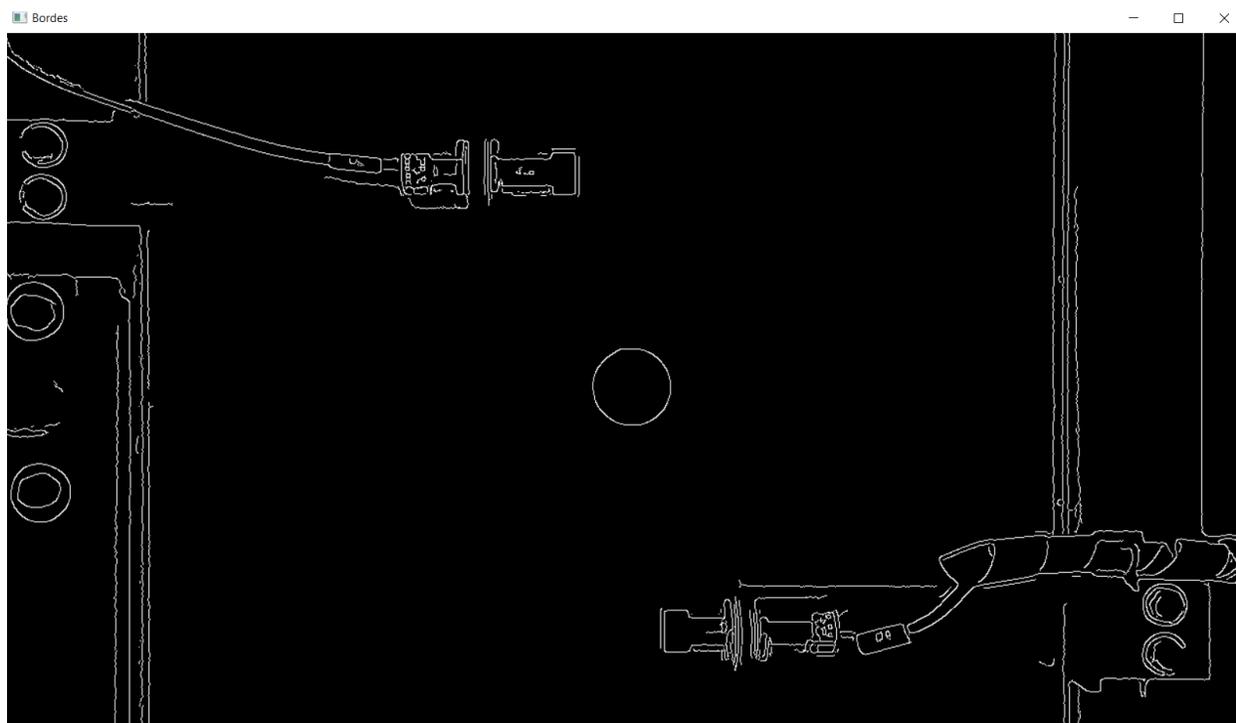
*Nota.* Secuencia para procesar la imagen para discretizar por defectos.

A continuación, se va a explicar a mayor detalle cómo se usó Open CV para clasificar las probetas por defectos, exceptuando los pasos para encontrar la probeta como transformación a la escala de grises, difuminación y uso de la transformada de Hough, ya que son los mismos que para la clasificación por color.

Para encontrar el contorno de las probetas se parte del uso de la escala de grises difuminada y se hace uso del método de detección de bordes Canny. El método Canny de Open CV tiene los siguientes argumentos, en primer lugar, la imagen de entrada que debe ser en escala de grises ya que se va a trabajar con un solo canal, el segundo y tercer argumentos son el valor mínimo de umbralización y el valor máximo de umbralización respectivamente, de esta manera se tiene un rango en el cual se van a reconocer los contornos de todos los objetos presentes en el video captura como se muestra en la figura 138. La línea de código usada fue: `edges = cv2.Canny(blur, 20, 50)` donde se tiene la imagen difuminada como entrada para encontrar los bordes en un rango de entre 20 y 50 de la escala de grises.

Figura 138

*Bordes detectados utilizando el método Canny*

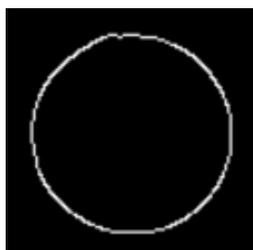


*Nota.* Detección de bordes.

Una vez que se han detectado los bordes lo que se procedió a realizar fue encontrar los bordes de la probeta, eso se realizó utilizando las coordenadas del centro de la probeta (círculo detectado utilizando la transformada de Hough) y pasando dichas al frame de contornos para aislar el contorno de la probeta del resto de objetos como se muestra en la figura 139 para una probeta normal y en la figura 140 y 141 para las probetas defectuosas. La operación se realizó con las siguientes líneas de código: `cx = elegido[0]` extrae la coordenada en x de la probeta, `cy = elegido[1]` extrae la coordenada en y de la probeta, `pixel_center = edges[cy, cx]` que ubican en la imagen de bordes el centro de la probeta y `interest_edge = edges[cy-50:cy+50,cx-50:cx+50]` que aíslan los bordes de la probeta del resto de la imagen de bordes.

**Figura 139**

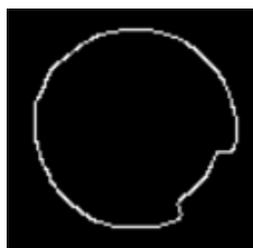
*Contorno de una probeta normal*



*Nota.* Borde detectado en probeta sin defecto.

**Figura 140**

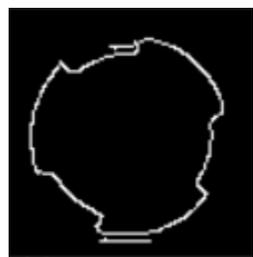
*Contorno de probeta defectuosa #1*



*Nota.* Borde detectado en probeta con defecto.

**Figura 141**

*Contorno de la probeta defectuosa #2*



*Nota.* Bordes detectados en probetas con defectos.

Para calcular el área de la probeta se usan los comandos ***cv2.findContours*** para encontrar todos los contornos y almacenarlos en un vector y ***cv2.contourArea*** para calcular el área de los contornos encontrados anteriormente. Si bien se podrían encontrar más contornos por ruido o una mala iluminación la ventaja de calcular el área de los mismos es que permiten filtrar los contornos hallados,

partiendo de este principio lo que se hizo fue calibrar el valor del área de las probetas normales y así se puede comparar el área de la probeta que ha sido detectada y ver si es normal si su área es mayor o igual al área calibrada o si es defectuosa si su área es menor al área calibrada. Para calcular el área de las probetas se usaron las siguientes líneas de código: ***contours, hierarchy = cv2.findContours(interest\_edge, cv2.RETR\_TREE, cv2.CHAIN\_APPROX\_SIMPLE)*** que encuentra cada borde presente en la imagen de los contornos de la probeta y dentro de ciclo ***for cnt in contours:*** se colocan las siguientes líneas de código ***area = cv2.contourArea(cnt)*** para calcular el área de los bordes detectados. ***if area >= 4825*** para reconocer si el área corresponde a una probeta normal y ***elif (area < 4825) and (area >= 4100):*** para reconocer si el área corresponde a una probeta defectuosa.

## Resumen

En el capítulo se detalló la construcción de cada subsistema, así como la justificación para la selección de los sensores, driver, variador de frecuencia y PLC. Se detalla además como se implementó al tablero eléctrico para el circuito de potencia que comanda el motorreductor trifásico y para el circuito de control que usa el PLC para implementar la lógica que permite activar/desactivar los actuadores en base al estado de los sensores. También se muestra los aspectos más relevantes respecto a cómo se programó el PLC y el Script de Python que ejecuta las funciones de visión artificial y establece/cierra la sesión entre cliente y servidor mediante el protocolo OPCUA. A continuación, se describe que se ha realizado en cada subsistema, los tableros y caja de electroválvulas.

***Subsistema de transporte:*** el subsistema de transporte se construyó utilizando los planos de conjunto y de detalle realizados en la etapa de diseño del capítulo 3, se requirió taladrar agujeros adicionales en la estructura de la banda para montar los soportes de la cámara y sensores del subsistema de reconocimiento, así como el ángulo donde se empernan la unidad FLR, la caja de electroválvulas y el soporte de la cámara. Se ajustaron los niveladores para adaptar la banda a al piso del

laboratorio de Automatización Industrial. Finalmente, para obtener las tres fases que requiere el motorreductor para funcionar se usó el variador de frecuencia CFW 100.

**Subsistema de dosificación:** el sistema de dosificación se construyó utilizando platinas de 3 mm de espesor, las mismas se cortaron y taladraron de acuerdo con sus planos detalle realizados en la etapa de diseño del capítulo 3, del mismo modo se utilizaron los modelos CAD generados en la etapa de diseño del capítulo 3 con los cuales se imprimieron las 4 piezas en 3D para el montaje del sensor, el dado del cilindro neumático y parte de la estructura donde se almacenan las probetas. El cilindro de 50 mm de carrera se montó utilizando uno de sus soportes y se ajustó su velocidad de salida y retorno utilizando las válvulas estranguladoras. Por último, se colocaron secciones de tubo cuadrado como alzas para que las probetas caigan adecuadamente.

**Subsistema de clasificación:** para la construcción del subsistema de clasificación se prepararon las platinas de 3 mm de espesor utilizando sus planos detalle realizados en la etapa de diseño del capítulo 3. A su vez, los perfiles V, se montaron utilizando sus soportes y arandelas especiales, también se armó el carro y se fabricó una pieza especial utilizando corte laser para acoplar el cilindro. Se generaron modelos CAD para imprimir en 3D los soportes de los sensores fin de carrera, el soporte del sensor capacitivo y soporte del sensor de presión que va montado sobre el cilindro. En cuanto a la instalación de la ventosa, se utilizó un acople entre la misma y el vástago del cilindro y se usó una unión en T para distribuir la presión de vacío hacia la ventosa y hacia el vacuostato. También se instalaron el motor paso a paso NEMA 23 y las poleas GT2 en los extremos del clasificador; la cinta se colocó alrededor de las poleas y se amarró al carro de manera que quede lo suficientemente tensionada. Finalmente se colocaron los recipientes para las probetas utilizando amarras.

**Subsistema de reconocimiento:** para construir el soporte de la cámara se prepararon los tubos que lo conforman mediante operaciones de corte, taladrado y soldadura y se montó sobre el ángulo que va en la estructura de la banda. También se generaron modelos CAD de los soportes de los sensores,

cámara y pieza en forma de T para imprimirlos en 3D. En cuanto a los sensores, los mismos se montaron y calibraron para que puedan detectar las probetas de A36 y ABS. Por último, se realizó la programación de las funciones de visión artificial para reconocer los colores de las probetas y cuales son defectuosas utilizando la librería Open CV de Python.

**Tablero de potencia y control:** se lo construyó utilizando normas para la distribución de elementos, asignación de colores de cable y de seguridad. Se utilizaron elementos industriales como breakers, fusibles, contactores, relés, guardamotor, borneras, PLC y fuente de alimentación de 24 V DC. El tablero eléctrico maneja el circuito de potencia que trabaja con un voltaje de entrada de 220 VAC (bifásico) y el circuito de control que trabaja con 24 VDC y utiliza el PLC cuyas entradas se conectaron a los sensores de todos los subsistemas y salidas a los actuadores de todos los subsistemas. También se instalaron elementos de mando como pulsadores, selectores y dos luces indicadoras.

**Tablero de control de motores:** se construyó para almacenar al variador de frecuencia que es el dispositivo del cual se obtiene la tercera línea para poder usar el motorreductor, el tablero también almacena el driver del motor paso a paso y un ventilador para evitar el sobrecalentamiento.

**Caja de electroválvulas y unidad FLR:** las electroválvulas solenoides que controlan a los cilindros neumáticos y generan el vacío en la ventosa mediante un tubo de efecto Venturi se montaron en una caja plástica, la misma junto a la unidad FLR se empernarón en un ángulo montado en la estructura de la banda transportadora.

**Integración de los subsistemas:** se realizó conectando todos los subsistemas al circuito de control. Las operaciones que ejecutan los actuadores de los subsistemas son controladas mediante la programación Ladder descargada en el PLC, el mismo que actúa como servidor gracias al protocolo OPCUA propio del controlador, para solicitar información del cliente (PC) que es donde se ejecuta el Script de Python que utiliza la cámara para reconocer las probetas por su color y defectos.

## Capítulo V

### Pruebas y resultados

En el capítulo se presentan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos a partir del análisis de los mismos. Las pruebas realizadas tienen la intención de determinar si los subsistemas que conforman el módulo didáctico del clasificador industrial cumplen su función.

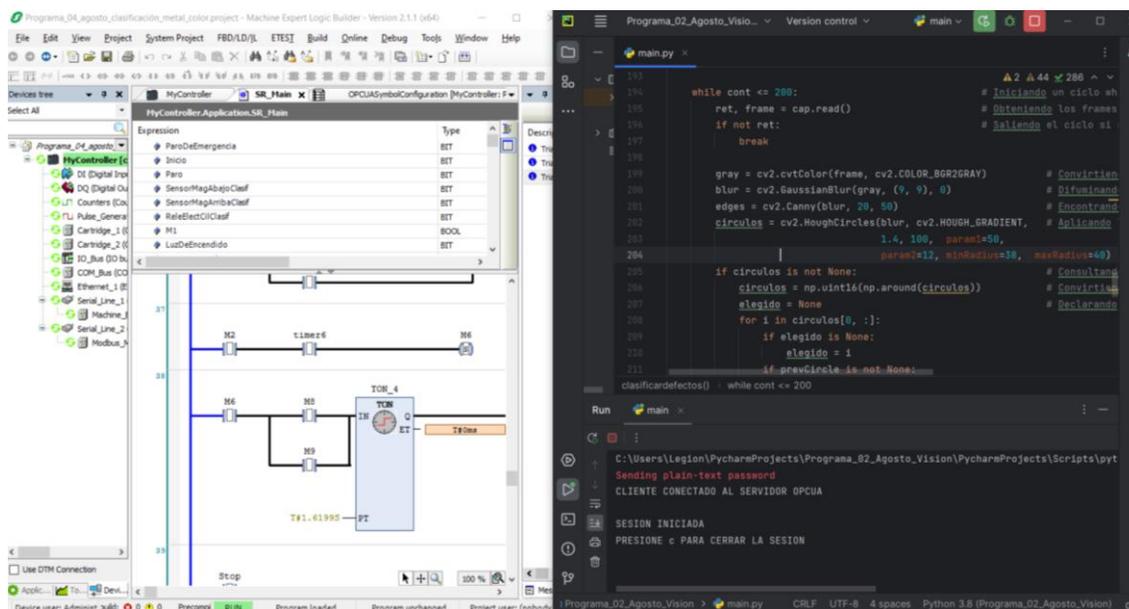
#### Definición de las pruebas

Es preciso determinar el funcionamiento de cada uno de los subsistemas que conforman el módulo didáctico del clasificador industrial, para ello se realizaron 3 pruebas cuyas condiciones varían respecto a la presión de trabajo utilizada, la iluminación y el orden en que se ubican las probetas en el contenedor.

Previo a empezar las pruebas es necesario cargar el programa en el PLC e iniciar sesión en el cliente como se muestra en la figura 142.

**Figura 142**

*Programación en el PLC y programa en Python ejecutándose*



*Nota.* Sesión iniciada y calibración de parámetros.

Asimismo, para el desarrollo de las pruebas se establecieron tres secuencias las cuales se presentan en la tabla 45 y el orden del tipo de clasificación (tabla 46), con la finalidad de evaluar su funcionamiento cuando el compresor está en plena carga y cuando ya se han producido variaciones de presión consecuencia de su uso continuo. También se marcaron las probetas para poder distinguirlas como se muestra en la figura 143.

**Tabla 45**

*Secuencias empleadas para las pruebas*

Orden en el contenedor	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	Secuencia		
1	1	3	7
2	2	1	4
3	3	2	3
4	4	4	1
5	5	5	2
6	6	7	5
7			8

*Nota.* Se indica la secuencia de las probetas para las tres primeras pruebas.

**Tabla 46**

*Orden de clasificación para cada prueba*

Prueba 1 y 2	Orden		
	Clasificación según su naturaleza	Clasificación según su color	Clasificación según sus defectos

	Orden		
Prueba 3	Clasificación según sus defectos	Clasificación según su naturaleza	Clasificación según su color

*Nota.* Se indica el orden en que se hicieron las pruebas.

### Figura 143

*Probetas marcadas para las pruebas*



*Nota.* Probetas empleadas para las pruebas.

#### **Prueba 1**

**Objetivo:** determinar cuántas probetas son clasificadas adecuadamente según su naturaleza y que fallos se presentan.

**Tipo de clasificación:** según su naturaleza (metálica o no metálica)

**Presión de trabajo:** 5.6 bar

Tabla 47

Resultados de la prueba 1 de clasificación según su naturaleza (metal o no metal)

						¿Cumplió su objetivo?				
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	1	A36	Si	NA	Si	5	5	0	0.39	La probeta no fue levantada por la ventosa
2	2	A36	Si	NA	Si	5	5.4	0.4	0.4	
3	3	ABS	Si	NA	Si	5.4	4.8	-0.6	0.37	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
4	4	ABS	Si	NA	Si	4.8	5.4	0.6	0.34	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
5	5	A36	Si	NA	Si	5.4	4.8	-0.6	0.4	
6	6	A36	Si	NA	Si	4.8	5.4	0.6	0.4	

*Nota.* En la tabla se registran los resultados obtenidos de la prueba 1.

**Observaciones:** De la prueba se determinó que las probetas no caen adecuadamente sobre la banda transportadora debido a su peso y la fricción entre las probetas de ABS. Sin embargo, el actuador y sensor capacitivo que conforman el subsistema de dosificación funcionan correctamente. Por otro lado, se evidenció que las caídas de presión son un efecto de la carga, descarga y sobrecalentamiento del compresor empleado para la ejecución de la prueba.

**Objetivo:** determinar cuántas probetas son discretizadas según su color y que fallos se presentan.

**Tipo de clasificación:** según sus características físicas - COLOR

**Presión de trabajo:** 5.6 bar

**Tabla 48**

*Resultados de la prueba 1 clasificadas según sus características físicas (color)*

										¿Cumplió su objetivo?
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	1	Violeta	Si	Si	Si	5.2	5	-0.2	0.39	La probeta no pudo ser levantada por la ventosa
2	2	Violeta	Si	Si	Si	5	4.8	-0.2	0.4	
3	3	Azul	Si	Si	Si	4.8	5.2	0.4	0.37	Sensor capacitivo del subsistema de reconocimiento no detectó la probeta
4	4	Azul	Si	Si	Si	5.2	4.2	-1	0.34	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
5	5	Violeta	Si	Si	Si	4.2	5.2	1	0.4	
6	6	Violeta	Si	Si	Si	5.2	5	-0.2	0.4	

*Nota.* Resultados de la prueba 1 de la clasificación por colores.

**Observaciones:** la variación de presión de 0.2 no afecta en el desempeño del dosificador y del clasificador, sin embargo, con una variación de 1 bar el desempeño parece verse comprometido en el dosificador pese a que la presión con la que genera el vacío es la necesaria. Por otra parte, se constató que la fricción entre probetas y el dado acoplado al vástago del cilindro neumático interviene.

**Objetivo:** determinar cuántas probetas son derivadas según su defecto y que anomalías se presentan.

**Tipo de clasificación:** según sus características físicas - DEFECTO

**Presión de trabajo:** 5.6 bar

**Tabla 49**

*Resultados de la prueba 1, clasificación según sus características físicas (defecto)*

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	1	Sin defecto	Si	Si	Si	5.2	4.8	-0.4	0.39	
2	2	Sin defecto	Si	Si	Si	4.8	5.4	0.6	0.4	
3	7	Con defecto	Si	Si	Si	5.4	4.8	-0.6	0.37	La probeta no pudo ser levantada por la ventosa
4	3	Sin defecto	Si	Si	Si	4.8	5.4	0.6	0.34	La probeta no fue detectada por el sensor capacitivo del dosificador

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
5	4	Sin defecto	Si	Si	Si	5.4	5	-0.4	0.4	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
6	5	Sin defecto	Si	Si	Si	5	5	0	0.4	

*Nota.* Resultados de la clasificación por defectos de la prueba 1.

**Observaciones:** las probetas de ABS no se dosifican adecuadamente a pesar de que el subsistema cumpla con su objetivo, y el clasificador no en la generación pudo levantar a la probeta en una ocasión y en la fuerza con la empuja a la probeta en el dosificador parece variar.

### **Prueba 2**

**Objetivo:** determinar cuántas probetas son clasificadas adecuadamente y que fallos se presentan.

**Tipo de clasificación:** según su naturaleza

**Presión de trabajo:** 5.6 bar

Tabla 50

Resultados de la prueba 2, clasificación según su naturaleza (metal o no metal)

		¿Cumplió su objetivo?							
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Observación
1	3	ABS	Si	NA	Si	5	5	0	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
2	1	A36	Si	NA	Si	5	5	0	
3	2	A36	Si	NA	Si	5	4.8	-0.2	
4	4	ABS	Si	NA	Si	4.8	5.2	0.4	La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora
5	5	A36	Si	NA	Si	5.2	4.8	-0.4	
6	7	ABS (con defecto)	Si	NA	Si	4.8	5.2	0.4	La probeta no fue detectada por el sensor capacitivo del dosificador y no fue levantada por la ventosa

Nota. En la tabla se registra los resultados de la prueba 2 de la clasificación por metal o no metal.

**Observaciones:** se presentan dificultades al ubicar las probetas de ABS sobre la banda transportadora, esto puede debe a que al momento de ser liberado la probeta de A36 el retorno del vástago y el peso que existe sobre la misma ocasiona que no se ubique correctamente en la base del subsistema de dosificación, por lo que al deslizar sobre la rampa y dejarse caer sobre la banda transportadora provoca que se vuelque y ruede. Sin embargo, pese a la variación de presión de 0.4 bar

se puede notar que no existe dificultad en la generación de vacío de las probetas que no presentan defectos.

**Objetivo:** determinar cuántas probetas son clasificadas adecuadamente y que fallos se presentan.

**Tipo de clasificación:** según sus características físicas - COLOR

**Presión de trabajo:** 5.6 bar

**Tabla 51**

*Resultados de la prueba 2, clasificación según sus características físicas (color)*

		¿Cumplió su objetivo?							
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Observación
1	3	Azul	Si	Si	Si	5.4	4.8	-0.6	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
2	1	Violeta	Si	Si	Si	4.8	5	0.2	
3	2	Violeta	Si	Si	Si	5	5.2	0.2	
4	4	Azul	Si	Si	Si	5.2	4.8	-0.4	La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora
5	5	Violeta	Si	Si	Si	4.8	5.4	0.6	La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora y no le levantó la ventosa

¿Cumplió su objetivo?

Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Observación
6	7	Azul (con defecto)	Si	Si	Si	5.4	4.6	-0.8	La probeta no fue detectada por el sensor del dosificador

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados de la prueba 2 al clasificar por colores.

**Observaciones:** Se presentan problemas en el dispensado de las probetas, especialmente en las de color azul. Sin embargo, no afecta significativamente en el desempeño del subsistema clasificador, puesto que se logra generar el vacío y se ubican en el respectivo depósito.

**Objetivo:** determinar cuántas probetas son clasificadas adecuadamente y que fallos se presentan.

**Tipo de clasificación:** según sus características físicas - DEFECTO

**Presión de trabajo:** 5.6 bar

Tabla 52

Resultados de la prueba 2, clasificación según sus características físicas (defecto)

						¿Cumplió su objetivo?			
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Observación
1	3	Sin defecto	Si	Si	Si	5	4	-1	La probeta rodó al ser empujada por el vástago del dosificador
2	1	Sin defecto	Si	Si	Si	4	3.2	-0.8	
3	2	Sin defecto	Si	Si	Si	3.2	4	0.8	
4	4	Sin defecto	Si	No	Si	4	4	0	La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora y el programa de Python no identifico si presenta o no defecto.
5	5	Sin defecto	Si	No	Si	4	3.6	-0.4	El programa de Python no identifico si presenta o no defecto
6	7	Con defecto	Si	No	Si	3.6	2.8	-0.8	El programa de Python no identifico si presenta o no defecto

Nota. En la tabla se registran los resultados de la prueba 2 de la clasificación por defectos.

**Observaciones:** pese a que el subsistema de reconocimiento no funcionó adecuadamente debido a la iluminación, el resto de los subsistemas trabajaron mejor. Por lo que se realizó nuevamente la prueba con iluminación natural, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 53.

**Tabla 53**

*Resultados de la prueba 2 según sus características físicas (defecto) con iluminación natural.*

										¿Cumplió su objetivo?	
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de clasificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Observación		
1	3	Sin defecto	Si	Si	Si	4	3.4	-0.6			
2	1	Sin defecto	Si	Si	Si	3.4	3	-0.4	La probeta no pudo ser levantada por la ventosa		
3	2	Sin defecto	Si	Si	Si	3	4.6	1.6			
4	4	Sin defecto	Si	Si	Si	4.6	5.6	1	La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora		
5	5	Sin defecto	Si	Si	Si	5.6	4.8	-0.8			
6	7	Con defecto	Si	Si	Si	4.8	5.2	0.4	La probeta no fue levantada por la ventosa		

*Nota.* Resultados de la prueba 2 de la clasificación por defectos.

**Observaciones:** las características físicas (defectos) fueron identificadas correctamente. Sin embargo, debido a la carga y descarga del compresor se presentaron variaciones que parecen afectar al adecuado posicionamiento de las probetas sobre la banda transportadora y la generación de vacío.

**Prueba 3**

En base a las pruebas realizadas anteriormente se definió variar la presión de trabajo y evaluar el desempeño del módulo didáctico.

**Objetivo:** determinar si los subsistemas del módulo didáctico de un clasificador industrial funcionan adecuadamente.

**Presión de trabajo:** 4 bares

**Tipo de clasificación:** según sus características físicas - DEFECTOS

**Tabla 54**

*Resultados de la prueba 3, clasificación según sus características físicas (defectos)*

										¿Cumplió su objetivo?
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de Clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	7	Con defecto	Si	Si	Si	4	4	0		
2	4	Sin defecto	Si	Si	Si	4	4	0		La probeta no fue detectada por el sensor del subsistema de dosificación
3	3	Sin defecto	No	Si	Si	4	3.8	-0.2		No se ubicó adecuadamente la probeta para ser dosificada
4	1	Sin defecto	Si	Si	Si	3.8	4	0.2		La ventosa no pudo succionar la probeta

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de Clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
5	2	Sin defecto	Si	Si	Si	4	4	0		La ventosa no pudo succionar la probeta
6	5	Sin defecto	Si	Si	Si	4	4	0		

*Nota.* En la tabla se registran los resultados obtenidos de la prueba 3 al clasificar por defectos.

**Observaciones:** la poca o nula variación de presión lo parece estar relacionada un mejor desempeño, sin embargo, debido a la carga y descarga del compresor la generación de vacío se ve comprometida.

Posterior a la prueba ejecutada se apaga el compresor y se espera un lapso de 15 minutos para que el compresor se enfríe y no se apague continuamente por el recalentamiento producido. En la tabla 55 se muestran los resultados obtenidos al clasificar según su naturaleza, es decir, si es metálico o no metálico.

Tabla 55

Resultados de la prueba 3, clasificación según su naturaleza

			¿Cumplió su objetivo?							
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	7	ABS (con defecto)	Si	NA	Si	4	4	0		
2	4	ABS	Si	NA	Si	4	4	0		
3	3	ABS	Si	NA	Si	4	4	0		
4	1	A36	Si	NA	Si	4	4	0		
5	2	A36	Si	NA	Si	4	4	0		La ventosa no pudo succionar la probeta
6	5	A36	Si	NA	Si	4	4	0		

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados de la prueba 3 de la clasificación según su naturaleza.

**Observaciones:** no existe variación de presión y los subsistemas funcionan correctamente sin ninguna anomalía a excepción del clasificador que no levanto la probeta en una ocasión.

En la tabla 56 se presentan los resultados al clasificar según sus características físicas – color. Se fijo una presión de trabajo de 4 bares e iluminación natural.

Tabla 56

Resultados de la prueba 3 al clasificar según sus características físicas (color)

						¿Cumplió su objetivo?				
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	7	Azul (con defecto)	Si	Si	Si	4	4	0		La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora
2	4	Azul	Si	Si	Si	4	4	0		La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora y la ventosa no logró levantar la probeta
3	3	Azul	Si	Si	Si	4	4	0		La probeta se volteó al caer sobre la banda transportadora
4	1	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0		
5	2	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0		
6	5	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0		

Nota. Resultados de la prueba 3 de la clasificación por colores.

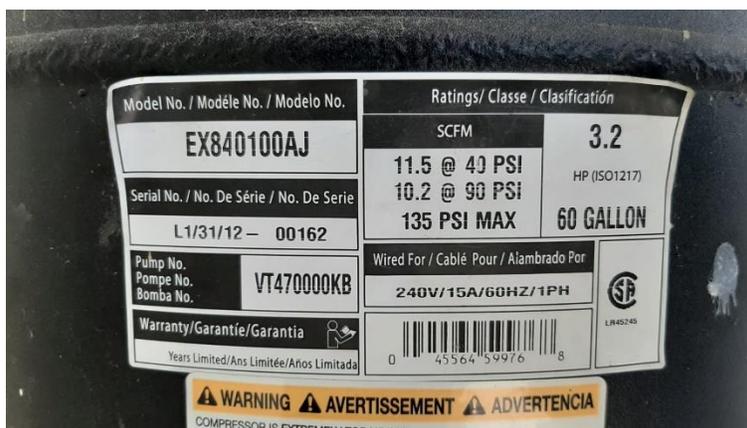
**Observaciones:** no existe variación de presión y todos los subsistemas realizan su función lo que muestra que la programación y construcción son adecuados. Sin embargo, debido al material de algunas de las probetas no se logra ubicar adecuadamente sobre la banda transportadora.

### Pruebas con otro compresor

Puesto que el compresor empleado para las pruebas 1, 2 y 3 presentó muchos problemas debido al sobrecalentamiento del mismo, se decidió emplear otro compresor disponible en el laboratorio cuyas características se muestra en la figura 144.

**Figura 144**

Características del compresor empleado para las pruebas



Nota. Características del compresor.

A su vez, se resolvieron problemas en las conexiones neumáticas puesto que se estaban presentando fugas de aire.

**Tabla 57**

Resultados de la prueba 1 con otro compresor

						¿Cumplió su objetivo?				
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	1	A36	Si	NA	Si	3.4	3.2	-0.2	0.39	
2	2	A36	Si	NA	Si	3.2	3.2	0	0.4	

										¿Cumplió su objetivo?
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
3	3	ABS	Si	NA	Si	3.2	3	-0.2	0.37	
4	4	ABS	Si	NA	Si	3	3	0	0.34	La probeta rodó en la banda
5	5	A36	Si	NA	Si	3	2.8	-0.2	0.4	La ventosa no levantó la probeta
6	6	A36	Si	NA	Si	2.8	2.8	0	0.4	

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados de la prueba con otro compresor.

**Observaciones:** mediante la prueba realizada se evidenció la presencia de fugas de aire, por lo que se realizaron los respectivos ajustes y correcciones.

**Tabla 58**

*Resultados de la prueba 2 según su naturaleza, con otro compresor*

										¿Cumplió su objetivo?
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	3	ABS	Si	NA	Si	4	4	0	0.3	
2	1	A36	Si	NA	Si	4	4	0	0.41	
3	2	A36	Si	NA	Si	4	4	0	0.4	

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
4	4	ABS	Si	NA	Si	4	4	0	0.36	La probeta quedó fuera del rango de detección del sensor capacitivo del subsistema de dosificación
5	5	A36	Si	NA	Si	4	4	0	0.39	
6	7	ABS (con defecto)	Si	NA	Si	4	4	0	0.3	La probeta quedó fuera del rango de detección del sensor capacitivo del subsistema de dosificación

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados con otro compresor y la secuencia de la prueba 1.

**Observaciones:** en la tabla 58 se muestran los resultados a partir de los cuales se pudo notar que no existe variación de presión, todos los subsistemas funcionan correctamente a pesar de que la cuarta y sexta probeta estuvieran fuera del rango de medición del sensor capacitivo del subsistema de dosificación.

En la tabla 59 se muestran los resultados obtenidos al someter a prueba el módulo didáctico de un clasificador industrial el cual clasifica según sus características físicas – color.

Tabla 59

Resultados de la prueba 2, clasificación según sus características físicas (color) con otro compresor

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	3	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0	4	La probeta rodó sobre la banda
2	1	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0	4	
3	2	Violeta	Si	Si	Si	4	3.8	-0.2	4	
4	4	Azul	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	3.8	La probeta cayó acostada
5	5	Violeta	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	3.8	
6	7	Azul (con defecto)	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	3.8	No se generó el vacío suficiente

Nota. En la tabla se muestran los resultados de la prueba 2 con otro compresor.

Asimismo, en la tabla 60 se muestran los resultados de la prueba 2 con una presión de trabajo de 4 bares, para clasificar las probetas de acuerdo con sus características físicas (defecto).

Tabla 60

Resultados con la secuencia de la prueba 2 y clasificación según sus características físicas (defecto) con otro compresor

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	3	Sin defecto	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	0.31	
2	1	Sin defecto	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	0.4	
3	2	Sin defecto	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	0.4	
4	4	Sin defecto (ABS)	Si	Si	Si	3.8	3.8	0	0.35	La probeta rodó sobre la banda
5	5	Sin defecto	Si	Si	Si	3.8	3.6	-0.2	0.37	
6	7	Con defecto	Si	Si	Si	3.6	3.6	0	0.28	

*Nota.* Resultados de la prueba 2, clasificación por defectos con otro compresor.

**Observaciones:** se pudo notar que inicialmente la presión disminuyó 0.2 bares y posterior a terminar el ciclo con la quinta probeta la presión decreció a 3.6 bares. Sin embargo, las probetas en su mayoría fueron clasificadas adecuadamente. Para las siguientes pruebas se incluyó una segunda probeta con defectos como se muestra en la figura 145, a la cual se la marco con el número 8.

**Figura 145**

*Segunda probeta con defectos*



*Nota.* En la figura se muestra la probeta con defectos que se incluye para las pruebas.

**Tabla 61**

*Resultados de la discretización de las probetas según sus características físicas (defecto) con la secuencia de la prueba 3 y con otro compresor*

¿Cumplió su objetivo?										
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	7	Con defecto	Si	Si	Si	3.8	3.6	-0.2	0.35	
2	4	Sin defecto	Si	Si	Si	3.6	3.6	0	0.36	
3	3	Sin defecto	Si	Si	Si	3.6	3.6	0	0.34	La probeta rodó sobre la banda
4	1	Sin defecto	Si	Si	Si	3.6	3.6	0	0.4	
5	2	Sin defecto	Si	Si	Si	3.6	3.6	0	0.42	
6	5	Sin defecto	Si	Si	Si	3.6	3.6	0	0.41	
7	8	Con defecto	Si	Si	Si	3.6	3.4	-0.2	0.32	La probeta estaba fuera del rango de medición del sensor

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados de la prueba 3, clasificación por defectos con compresor 2.

**Observaciones:** en la tabla 61 se muestran los resultados de la prueba, se destaca la en su mayoría nula variación de presión y total generación de vacío.

Posterior a la culminación de la prueba anterior se elevó la presión de trabajo para establecerla nuevamente en 4 bares. Por lo tanto, los resultados obtenidos con la misma secuencia de la prueba 3 y con una segunda probeta con defectos se muestran en la tabla 62.

**Tabla 62**

*Resultados al discretizar las probetas según su naturaleza según la secuencia de la prueba 3 y con otro compresor*

		¿Cumplió su objetivo?								
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
1	7	ABS (con defecto)	Si	NA	Si	4.2	4.2	0	0.41	Rodó la probeta y no levantó la ventosa
2	4	ABS	Si	NA	Si	4.2	4	-0.2	0.39	Rodó la probeta y no levantó la ventosa
3	3	ABS	Si	NA	Si	4	4	0	0.4	
4	1	A36	Si	NA	Si	4	3.8	-0.2	0.39	Dejo la siguiente probeta inclinada
5	2	A36	Si	NA	Si	3.8	4	0.2	0.42	
6	5	A36	Si	NA	Si	4	4	0	0.42	

		¿Cumplió su objetivo?								
Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación	Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
7	8	ABS (con defecto)	Si	NA	Si	4	4	0	0.42	Cayó acostada la probeta y no detectó el sensor capacitivo del dosificador

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados de la prueba 3, clasificación según su naturaleza con otro compresor.

**Observaciones:** A partir de los resultados de la tabla 62 se pudo notar que para que se tenga un mejor desempeño de la dosificación es importante fijar la presión de trabajo en 4 bares, de esta manera se evita que las probetas rueden al caer sobre la banda transportadora y que no se genere el vacío necesario.

Por lo que en la siguiente prueba se estableció la presión de trabajo en 4 bares, de esta manera los resultados obtenidos se presentan en la tabla 63.

Tabla 63

Resultados obtenidos al clasificar según las probetas según su color con la secuencia de la prueba 3 y con otro compresor

Orden en el contenedor	Secuencia	Características de las probetas	¿Cumplió su objetivo?			Presión inicial	Presión final	Variación de presión	Presión de vacío	Observación
			Subsistema de dosificación	Subsistemas de reconocimiento	Subsistema de clasificación					
1	7	Azul (con defecto)	Si	Si	Si	4	4	0	0.42	
2	4	Azul	Si	Si	Si	4	4	0	0.37	No detecto sensor capacitivo de reconocimiento
3	3	Azul	Si	Si	Si	4	4	0	0.4	Cayó acostada la probeta
4	1	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0	0.42	
5	2	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0	0.42	Dejo la siguiente probeta inclinada
6	5	Violeta	Si	Si	Si	4	4	0	0.4	
7	8	Azul (con defecto)	Si	No	No	4	4	0	0.31	No detecto el sensor del dosificador y la ventosa no la levantó

*Nota.* En la tabla se muestran los resultados de la prueba, con otro compresor y clasificación por colores.

**Observaciones:** se puede evidenciar que no existe variación de presión y que la probeta 8 al poseer más defectos dificulta su detección puesto que se encuentra fuera del rango de medición del sensor capacitivo del subsistema de dosificación.

### **Prueba de independencia de Chi cuadrado**

Los datos que se tienen como resultados son cualitativos porque que los subsistemas resultados de los subsistemas muestran si funcionan bien o fallan, se analizaron 110 ciclos con distintas presiones, entonces se puede realizar un análisis estadístico entre la presión del subsistema neumático y el funcionamiento de los subsistemas de dosificación y de clasificación.

Al tener un rango de presiones que van de 2.8 a 5.6 bares en el circuito neumático, se pueden separar las pruebas en al menos 3 grupos, de esta manera al tener variables cualitativas con muestras relacionadas e independientes se decidió realizar pruebas de independencia de Chi cuadradas, una para el subsistema de dosificación y otra para el subsistema de clasificación.

Los resultados de los subsistemas de dosificación y de clasificación son las variables dependientes y la presión del circuito neumático es la variable independiente. Para lo cual se plantean las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H0): Los resultados obtenidos son independientes de la presión
- Hipótesis alternativa (H1): Los resultados obtenidos son dependientes de la presión

Las pruebas se van a realizar con un nivel de significancia del 95%, si el p-valor obtenido es menor a 0.05 se rechaza la H0 en favor de H1.

#### ***Prueba para el subsistema de dosificación***

En la tabla 64 se presentan los resultados para los tres grupos de rangos de presión, se realizó la sumatoria para a continuación obtener los porcentajes de cada grupo de resultados (Ok o Falla).

**Tabla 64**

*Resultados obtenidos del subsistema de dosificación*

Presión inicial (Bar)	(<4)	(4.1-5)	(>5.1)	Σ	%
Dosif. Ok	55	14	6	<b>75</b>	68.1818182
Dosif. Falla	19	10	6	<b>35</b>	31.8181818
<b>Σ</b>	<b>74</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>110</b>	

*Nota.* Resumen de los resultados obtenidos de las pruebas 1,2 y 3 del subsistema de dosificación.

Con las sumatorias por grupos de rangos de presión y los porcentajes de cada grupo de resultados se construye la tabla 65.

**Tabla 65**

*Valores esperados del subsistema de dosificación*

Presión inicial (Bar)	(<4)	(4.1-5)	(>5.1)	Σ
Dosif. Ok	50.4545455	16.3636364	8.18181818	<b>75</b>
Dosif. Falla	23.5454545	7.63636364	3.81818182	<b>35</b>
<b>Σ</b>	<b>74</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>110</b>

*Nota.* En la tabla se muestran los valores esperados del subsistema de dosificación.

En Excel se utilizó la función PRUEBA.CHICUAD donde se ingresaron los datos de los resultados obtenidos vs los esperados y se obtuvo el siguiente valor P Chi- cuadrado.

$$p - \text{valor} = 0.12315713$$

El valor P es mayor a 0.05, por lo tanto, H0 no se rechaza lo que indica que los resultados obtenidos son independientes de la presión para el subsistema de dosificación.

### **Prueba para el subsistema de clasificación**

En la tabla 66 se presentan los resultados para los tres grupos de rangos de presión, se realizó la sumatoria para a continuación obtener los porcentajes de cada grupo de resultados (Ok o Falla).

**Tabla 66**

*Resultados obtenidos del subsistema de clasificación*

Presión inicial (Bar)	(<4)	(4.1-5)	(>5.1)	$\Sigma$	%
Clasif. Ok	65	18	11	<b>94</b>	85.4545455
Clasif. Falla	9	6	1	<b>16</b>	14.5454545
$\Sigma$	<b>74</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>110</b>	

*Nota.* En la tabla se muestra el resumen de los resultados obtenidos de la prueba 1,2 y 3 del subsistema de clasificación.

Con las sumatorias por grupos de rangos de presión y los porcentajes de cada grupo de resultados se construye la tabla 67.

**Tabla 67**

*Valores esperados del subsistema de clasificación*

Presión inicial (Bar)	(<4)	(4.1-5)	(>5.1)	$\Sigma$
Clasif. Ok	63.2363636	20.5090909	10.2545455	<b>94</b>
Clasif. Falla	10.7636364	3.49090909	1.74545455	<b>16</b>
$\Sigma$	<b>74</b>	<b>24</b>	<b>12</b>	<b>110</b>

*Nota.* En la tabla se muestran los valores esperados para tres rangos de presión inicial.

En Excel se utilizó la función PRUEBA.CHICUAD donde se ingresaron los datos de los resultados obtenidos vs los esperados y se obtuvo el siguiente valor P Chi- cuadrado.

$$p - \text{valor} = 0.24400957$$

El valor P es mayor a 0.05, por lo tanto, H0 no se rechaza lo que indica que los resultados obtenidos son independientes de la presión para el subsistema de clasificación.

### **Resumen**

En el capítulo se detallaron los resultados obtenidos al realizar tres pruebas con tres secuencias diferentes y con dos compresores con distintas capacidades de almacenamiento, con la finalidad de analizar cómo la presión influye en el desempeño del circuito neumático y por ende en los subsistemas.

En primera instancia se realizó la prueba 1 con una presión de trabajo de 5.6 bares para que posterior a su análisis se fije una nueva presión de trabajo de 4 bares la cual fue empleada para el resto de las pruebas. Asimismo, se determinó la secuencia con la que se obtienen mejores resultados y los aspectos que influyen en la presentación de novedades como una orientación errónea de la probeta sobre la banda transportadora.

Por último, se realizó una prueba de independencia Chi cuadrado para comprobar si de acuerdo con los datos obtenidos se puede establecer una relación de dependencia entre la presión inicial del circuito neumático y la presencia de fallos en los subsistemas de dosificación y clasificación

## Capítulo VI

### Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

En el capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros obtenidos posterior al desarrollo del proyecto.

#### Conclusiones

- Se logró diseñar e implementar exitosamente un módulo de 165x159x80 mm que realiza la clasificación de probetas por su tipo de material y características físicas visibles, compuesto por cuatro subsistemas los cuales son: subsistema de transporte, subsistema de dosificación, subsistema de reconocimiento y subsistema de clasificación. Cuyo ciclo de procesamiento dura aproximadamente un minuto, el cual comprende el lapso desde que la probeta sale del subsistema de dosificación hasta que es depositada en su recipiente por el subsistema de clasificación. La misma que fue establecida para que cada etapa del proceso pueda ser fácilmente diferenciada y a su vez para que las funciones de visión artificial puedan procesar la información. Para la integración de los subsistemas del módulo se empleó un Controlador Lógico Programable (PLC) Modicon M241 con salidas tipo transistor, por lo cual se construyó un tablero de potencia y control para comandar y proteger los equipos conectados a la red eléctrica. Por otra parte, se instaló el circuito neumático cuyos actuadores forman parte de los subsistemas de dosificación y clasificación. Para finalizar se logró configurar el PLC como un servidor OPC UA y se estableció una conexión punto a punto mediante un cable Ethernet con el cliente (PC), el cual ejecutó el Script de Python con las funciones de visión artificial para usar la cámara como parte del proceso del subsistema de reconocimiento, cabe recalcar que la arquitectura orientada a servicios con la que funciona el estándar OPCUA permite que toda la configuración de conexión se realice solo con métodos en el Script de Python.
- Se implementó un subsistema de transporte conformado por una banda transportadora de 165x78x48 mm cuyas especificaciones son las de un equipo de nivel industrial. En primer lugar,

funciona con un motorreductor trifásico de 0.25 hp con relación de reducción de 80 a 1 controlado por un variador de frecuencia cuya frecuencia se fijó en 25 Hz, el mismo que se conectó al PLC para controlar el encendido y apagado del motorreductor. Segundo la estructura de la banda es de acero ASTM A36 y está construida mediante soldadura SMAW y uniones no permanentes (pernos y tuercas) por lo que es firme y resistente. Además, cuenta con un sistema de tensado con tornillos, niveladores de piso que permiten variar la altura de la banda desde 770mm a 800mm y darle estabilidad, adicional cuenta con una cinta de PVC sintético de 3mm de espesor con unión vulcanizada la cual permitió mover correctamente las probetas por lo cual tiene muy buena adherencia.

- Se construyó un subsistema de dosificación automático constituido por un sensor capacitivo con un rango de medición de 10 mm para detectar la presencia de las probetas en el contenedor cuyas piezas fueron fabricadas en impresión 3D, un cilindro neumático de doble efecto de 50 mm de carrera y 20 mm de diámetro montado horizontalmente, el cual fue comandado por una electroválvula monoestable 5/2 cuya velocidad se calibra gracias a dos válvulas reguladoras de flujo. Además, se acopló un dado al vástago del cilindro neumático cuya geometría permitió posicionar adecuadamente las probetas para que sean empujadas por una rampa que se encuentra a 20mm de separación de la cinta de la banda transportadora.
- Se implementó un subsistema de reconocimiento capaz de identificar correctamente si las probetas son metálicas o no metálicas gracias a un sensor inductivo de 8 mm de rango. Además, se logró diferenciar a las probetas en base a su color, es decir si son azul o violeta mediante una captura de video por una cámara web de 480px, el preprocesamiento de la imagen en escala de grises, su difuminación con un kernel de 9x9 y el modelo HSV. También se reconoció las probetas defectuosas mediante el reconocimiento de sus bordes y el cálculo de sus áreas.
- Se construyó un subsistema de clasificación con perfiles de aluminio tipo V el cual permitió el desplazamiento vertical y horizontal para depositar las probetas en el recipiente respectivo

gracias a, un cilindro neumático de 100 mm de carrera y 20 mm de diámetro el cual se montó en sentido vertical al carro cuyo movimiento fue gracias a un sistema de cinta y poleas GT2 y al accionamiento de un motor paso a paso NEMA 23. El mismo que fue controlado por una instancia conocida como PTO para programar y controlar el arranque, paro y cambio de giro del motor desde el PLC. Cabe aclarar que el subsistema de clasificación es el que tiene más sensores y que gracias a los datos que entregan los mismos se pudo realizar exitosamente la secuencia de pasos que debían seguir los actuadores. Es decir, se logró levantar la probeta mediante el vacío generado en la ventosa, trasladar el carro mientras la ventosa succiona la probeta, soltar la probeta sobre su respectivo depósito y regresar el carro a la posición inicial.

- El módulo didáctico del clasificador industrial implementado fue sometido a pruebas de funcionamiento con el objetivo de determinar la funcionalidad y posibles fallos que pudieran presentarse. De lo cual se concluyó que: es necesario establecer una presión de trabajo de estable de al menos 4 bares para que todos los subsistemas funcionen adecuadamente, sin embargo, la prueba de independencia Chi cuadrado aceptó la hipótesis nula que establece que los resultados obtenidos son independientes de la presión.

- Es necesario una presión de vacío generada sea entre -0.3 y -0.4 Bares para que se produzca la succión de la probeta por la ventosa. Además, no debe presentarse una variación de presión mayor a 0.3 bares pues esto incrementa la probabilidad de tener anomalías en el funcionamiento, como mal posicionamiento de la probeta sobre la banda, desvío de la probeta y por ende probetas fuera del rango de medición de los sensores y una presión de vacío escasa produciendo una deficiente succión de la probeta.

## Recomendaciones

- Se recomienda calibrar los parámetros que dependen del entorno en el que se encuentre el módulo didáctico, como por ejemplo la altura de la banda transportadora y la estabilidad de la misma, así como la posición e inclinación de la cámara.
- Se recomienda limpiar la cinta del subsistema de transporte después de cada uso y tensionar la cinta periódicamente si es que se mantiene en un uso continuo. Para ello es recomendable leer el manual de usuario para realizar un correcto tensionado.
- Para el subsistema de dosificación es recomendable calibrar la velocidad de salida del vástago del cilindro de 50 mm mediante sus válvulas estranguladoras y la sensibilidad del sensor capacitivo si se desea variar el material a identificarse.
- En caso de que los sensores digitales no detecten bien a las probetas, se recomienda ajustar su sensibilidad mediante los tornillos que tienen en su parte posterior, además se pueden acercar a su área de detección utilizando sus tuercas y rosca externa.
- Si se va a utilizar la clasificación por características visibles, se recomienda calibrar los límites en la detección de bordes con el método Canny y los parámetros 1 y 2 de la transformada de Hough, además es necesario verificar cual es el área límite para separar entre probetas normales y defectuosas, ya que la iluminación ambiental puede variar según la hora del día y condiciones meteorológicas.
- Si en algún caso la cinta del sistema de poleas GT2 del subsistema de clasificación se afloja o se pierde el paso, se recomienda tensionarla de nuevo moviendo los soportes de la polea y motor paso a paso hacia afuera.
- El botón de paro solo se debe presionar si el carro del subsistema de clasificación se encuentra en su posición inicial es decir en el centro, ya que caso contrario no se podrá recoger la probeta o los módulos de la instancia PTO del programa del PLC se van a bloquear. Dado el caso se

deberá resetear el PLC, descargar y ejecutar el programa para regresar el carro al centro del subsistema de clasificación.

- Hay que asegurarse que la presión de trabajo del circuito neumático sea de 4 bares para un correcto funcionamiento de los subsistemas de dosificación y clasificación. Además, es recomendable verificar la presión de vacío medida puesto que si no supera la presión configurada de -0.1 bar no se podrá cambiar de estado.

- Si la unidad FLR empieza a saturarse de gotas de agua, se recomienda cubrir los serpentines que interconectan los tableros.

### **Trabajos futuros**

- Diseñar e implementar un sistema de clasificación robusto compuesto por más bandas transportadoras que incluyan etapas de empaquetamiento y paletizado que se controlen con una red de PLCs.

## Bibliografía

- Muñoz Oporto, C. A., & Lagos Correa, P. A. (2013). *Diseño Cinta Transportadora Intralox para la Pesquera Bahía Caldera S.A.* [Seminario de titulación para optar al título de ingeniero de ejecución en Mecánica], Universidad del Bio-Bio.
- Bastian Solutions. (s.f.). *www.bastiansolutions.com*. Obtenido de <https://www.bastiansolutions.com/solutions/technology/sortation/conveyor/shoe-sorter/>
- Bolton, W. (2015). *MECHATRONICS ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS IN MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING Sixth Edition*. Pearson.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México, D.F.: McGrawHill.
- Canu, S. (19 de Octubre de 2021). *pysource.com*. Obtenido de [#https://pysource.com/2021/10/19/simple-color-recognition-with-opencv-and-python/](https://pysource.com/2021/10/19/simple-color-recognition-with-opencv-and-python/)
- Chumillas Technology S.L. (16 de Agosto de 2023). *ChT*. Obtenido de <https://www.chumillastechnology.com/soluciones/clasificacion-equipos-industriales/>
- (2002). *Conveyor Equipment Manufacturers Assosiation, CEMA*.
- Córdova Ames, W. (2008). TRIZ, la herramienta del pensamiento e innovación sistemática Contabilidad y Negocios. Lima, Perú. Recuperado el 20 de 11 de 2022
- Ekos. (26 de Febrero de 2019). *ekosnegocios.com*. Obtenido de <https://ekosnegocios.com/articulo/industria-el-sector-que-genera-mayor-valor-agregado>
- Electrocable. (2018). *electrocable*. Recuperado el 04 de 04 de 2023, de <https://www.electrocable.com/uploads/catficha/cata-logo-electrocables-2018.pdf>
- ELECTROSTORE. (s.f.). *grupoelectrostore.com*. Obtenido de <https://grupoelectrostore.com/shop/modulos-y-shields/controladores-de-motores/modulo-controlador-de-motor-paso-a-paso-tb6600-5a/>

- Fuentes Ocejo, A. B. (2017). *Diseño y construcción de una banda transportadora, con brazo clasificador para la automatización del empaquetado de toallas sanitarias, para la empresa de coonstruccipon de maquinaria J.W. - CEMAIN*. [Trabajo de titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE]. Repositorio institucional de la Universidad De las Fuerzas Armadas - ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13628>
- G.I.Eicom. (s.f.). *blog.gieicom.com*. Obtenido de <https://blog.gieicom.com/tipos-de-sorters-o-clasificadores-que-deberias-conocer>
- Gadd, K. (2011). TRIZ for Engineers: Enabling Inventive Problem Solving. En J. W. Sons. Recuperado el 26 de 11 de 2022
- Global Knowledge. (s.f.). *faculty.sfcc.spokane.edu*. Obtenido de [https://faculty.sfcc.spokane.edu/Rudlock/files/WP\\_Simoneau\\_OSIModel.pdf](https://faculty.sfcc.spokane.edu/Rudlock/files/WP_Simoneau_OSIModel.pdf)
- Guerrero, V., Yuste, R. L., & Martinez, L. (s.f.). *Comunicaciones Industriales*. Alfaomega.
- Habasit AG. (2019). Cintas transportadoras con estructura de tejido. *Guía de ingeniería*. España.
- Investigación y Aplicaciones A Procesos,S.L. (17 de Septiembre de 2019). *MCR*. Obtenido de <https://mcr.es/la-dosificacion-industrial/>
- ITOHDENKI. (s.f.). *itoh-denki.com*. Obtenido de <https://www.itoh-denki.com/>
- JPYROLL. (2023). *DirectIndustry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/hebei-joyroll-conveyor-machinery-co-ltd/product-213903-2222313.html>
- LTA, P. C. (22 de Octubre de 2022). *Proindservc*. Obtenido de <https://proindserv.com.ec/>
- Marín Cano, A., Romero, Á., & Jiménez, J. (2015). *Classification system for artificial vision type Tommy mango*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas. Medellín: UIS Ingenierías. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/21-31/6234#:~:text=Los%20sistemas%20de%20visi%C3%B3n%20artificial,post%2Dcosecha%2C%20hasta%20llegar%20al>

- Marriott, A. (2023). *Marriot tienda online*. Recuperado el 03 de 04 de 2023, de <https://almacenesmarriott.com/producto/modulo-ledex-easy-c-iman-15w-6500k-100-260v-fp-0-9-18-3x3-2cm-20000h-120-1500lm/>
- Mathworks. (s.f.). *la.mathworks.com*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/robotics/ug/design-a-trajectory-with-velocity-limits-using-a-trapezoidal-velocity-profile.html>
- Miravete de Marco, A., Larrodé, E., Castejón, L., & Cuartero, J. (2002). *Los transportes en la ingeniería industrial (teoría)*. Reverte. Recuperado el 29 de Octubre de 2022, de [https://books.google.com.ec/books?id=O\\_BD0iXO-2QC&dq=bandas+transportadoras+que+son&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.ec/books?id=O_BD0iXO-2QC&dq=bandas+transportadoras+que+son&source=gbs_navlinks_s)
- Mogro Borja, M. F. (2018). *Diseño e implementación de una línea de clasificación asistida por un manipulador robótico MELFA RV-2SDB, mediante el uso de visión artificial para generación de trayectorias reconfigurables y la incorporación de un sistema de seguridad activa*. [Tesis magistral, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE]. Repositorio institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/simple-search?location=%2F&query=Dise%C3%83%C2%B1o+e+implementaci%C3%83%C2%B3n+de+un+a+línea+de+clasificaci%C3%83%C2%B3n+asistida+por+un+manipulador+rob%C3%83%C2%B3tico+MELFA+RV-2SDB%2C+mediante+el+uso+de+visi%C3%83%C2%B3n+a>
- Motor Challenge. (s.f.). *www.energy.gov*. Obtenido de <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/10097517.pdf>
- OPC Foundation. (s.f.). *opcfoundation.org*. Obtenido de <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2023/05/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-EN.pdf>
- Pastor Peidro, D. (2019). *Diseño y construcción de una cinta transportadora para el transporte de masa de pan*. [Trabajo final de grado en Ingeniería Mecánica]. Universidad Politécnica de Valencia.

- Peeters, L. (Septiembre de 2013). *www.researchgate.net*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/257531785\\_A\\_Background\\_Color\\_Scheme\\_for\\_Pipe\\_r\\_Plots\\_to\\_Spatially\\_Visualize\\_Hydrochemical\\_Patterns](https://www.researchgate.net/publication/257531785_A_Background_Color_Scheme_for_Pipe_r_Plots_to_Spatially_Visualize_Hydrochemical_Patterns)
- Post, O., Sepalla, J., Koivisto, & Hannu. (Enero de 2009). *www.researchgate.net*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/221646063\\_The\\_Performance\\_of\\_OPC-UA\\_Security\\_Model\\_at\\_Field\\_Device\\_Level](https://www.researchgate.net/publication/221646063_The_Performance_of_OPC-UA_Security_Model_at_Field_Device_Level)
- ProDIN. (2019). *ProDIN Protecciones eléctricas*. Recuperado el 04 de 04 de 2023, de <https://zoloda.com.ar/wp-content/uploads/2018/11/Cat%C3%A1logo-Interruptores-Termomagn%C3%A9ticos-y-Diferenciales-5.pdf>
- Rinaldi, J. S. (19 de Noviembre de 2019). *www.rtautomation.com*. Obtenido de <https://www.rtautomation.com/rta-blog/what-exactly-is-ua-tcp/>
- Ristec. (s.f.). *risetecsr.com*. Obtenido de <https://risetecsr.com/my-product/wheel-diverter-sorter/>
- Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). *ingemecanica.com*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn84.html>
- SCALETRONIC. (s.f.). *scaletronicglobal.com*. Obtenido de <https://scaletronicglobal.com/product/tilt-tray-sorter/>
- Schneider Electric. (01 de Mayo de 2023). *www.se.com*. Obtenido de <https://www.se.com/es/es/download/document/EIO0000004270/>
- SeamPedia. (03 de Mayo de 2018). *Qué es una línea de producción?* Obtenido de <https://seampedia.com/que-es-una-linea-de-produccion/>
- Shell, R. L., & Hall, E. L. (2000). *Handbook of Industrial Automation*. Cincinnati: MARCEL DEKKER, INC.
- Sierra, O. G., & Torres, Z. A. (2015). *Diseño de una banda transportadora de llantas para la empresa Bridgestone de Colombia mediante metodología de diseño QFD*. [Artículo], Universidad Distrital "Francisco José de Caldas".

SKF. (Julio de 2023). *SKF*. Obtenido de <https://www.skf.com/ar/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/flanged-ball-bearing-units/productid-UCF%20204-12>

SKF, A. (14 de Enero de 2023). *SKF*. Obtenido de <https://www.skf.com/ar/footer/site-ownership>

Sucar, L. E., & Gómez, G. (s.f.). *Visión Computacional*.

VARVEL. (s.f.). *varvelusa.com*. Obtenido de <https://varvelusa.com/wp-content/uploads/2022/10/D00-RSRT-STD-FRPTES-ED02-REV00-2.pdf>

## Apéndices