

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Área Académica de Ingeniería Mecatrónica**



**Diseño de una estación automatizada de un sistema de inspección de  
embobinado y cables**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Gabriel Antonio Salas Araya**

**Cartago, Noviembre de 2022**



Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Anteproyecto de Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema y asesoramiento técnico de miembros de Kopar Latinoamericana, S.A.

Asumo completa responsabilidad sobre el trabajo realizado y por el correspondiente contenido.

Cartago, Noviembre 2022



Gabriel Salas Araya

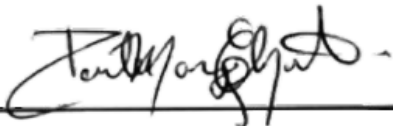
Céd: 2-0741-0880

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN  
ACTA DE APROBACIÓN**

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Gabriel Antonio Salas Araya

Proyecto: Diseño de una estación automatizada un sistema de inspección de embobinado y cables



Ing. Paula Elena Monge Chanto

Asesor

Cartago, Noviembre 2022

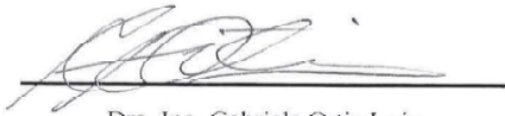
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN**  
**ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Gabriel Antonio Salas Araya.

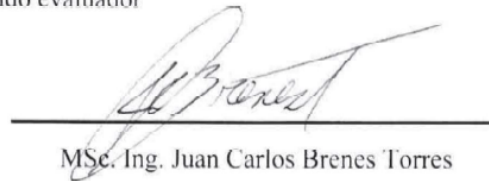
Proyecto: Diseño de una estación automatizada un sistema de inspección de embobinado y cables

Miembros del jurado evaluador



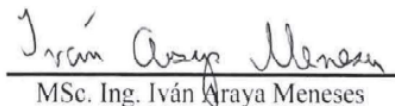
Dra. Ing. Gabriela Ortiz León

Jurado



MSc. Ing. Juan Carlos Brenes Torres

Jurado



MSc. Ing. Iván Araya Meneses

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, Noviembre 2022

## Resumen

El presente informe describe el proceso de diseño de una estación automatizada de inspección de cables y embobinados para el laboratorio de Kopar Latinoamericana. La razón por la que se desea diseñar la estación es debido a la cantidad de solicitudes sobre inspecciones de estos productos que llegan a la empresa, puesto que el mayor de los problemas que presentan los clientes de Kopar es el tiempo de inspección alto que manejan debido a que las inspecciones las hacen de manera manual.

Para llegar a la solución de este problema se llevó a cabo un proceso de diseño de ingeniería donde se consideraron varias soluciones posibles y luego de varios procesos de filtrado y comparación se llegó a un concepto de solución ganador el cual es el elegido para desarrollar y eventualmente someter a pruebas para validación del sistema.

En este caso se ha utilizado un brazo robótico como sistema de movilización, un sistema de visión capaz de realizar inspecciones gracias a sus herramientas de inspección. El trabajo en conjunto de estos equipos más el diseño de la estructura capaz de soportar las cargas creadas por el sistema de inspección, lograron el objetivo de disminuir el tiempo de ciclo de las inspecciones y además agregar la forma automatizada del proceso.

**Palabras Clave:** Sistema de visión, Brazo Robótico, Óptica, Diseño mecánico, Embobinados, Cables.

## Abstract

This report describes the design process of an automated wires and coils inspection station for the Kopar Latinamericana laboratory. The reason why it is desired to design the station is due to the number of requests for inspections of these products that reach the company, since the biggest problem that Kopar's clients present is the high inspection time they handle due to the manual process of inspection.

To reach the solution of this problem, an engineering design process is carried out where several possible solutions are considered and after several filtering and comparison processes, a winning solution concept is reached which later is chose to be developed and eventually submit to tests for validation of the system.

In this case the devices used in the project are a robotic arm as a mobilization system and a vision system capable of carrying out inspections thanks to its inspection tools. The work of these devices plus the design of the structure capable of supporting the loads created by the inspection system, achieved the objective of reducing the cycle time of the inspections and adding the automated form of the process.

**Keywords:** Vision System, Robotic arm, Optics, Mechanical design, Coils, Wires.

## Dedicatoria

A mi papá Ronald Salas Paniagua y a mi mamá Flor Emilia Araya Herrera porque siempre han estado ahí para mí brindándome su apoyo incondicional, nunca han dejado de creer en mí y siempre me siguen alentando que siga adelante en todos los proyectos que me proponga.

A mis hermanos, mi familia cercana y mis amigos que han sido un gran apoyo y de gran ayuda en mi formación como persona y como profesional. También a mi pareja Claudia Espinoza Bolaños porque desde siempre ha estado a mi lado apoyándome para cerrar todos los proyectos que me he propuesto y porque siempre está para mí cuando lo necesite.

## Agradecimiento

Le agradezco primeramente a Dios por haberme dado la sabiduría para poder realizar este proyecto y dejarme cumplir esta etapa tan importante.

Agradezco a mi tutora Paula Monge Chanto por ser una guía durante este proceso y por ser de gran ayuda en motivación y asesoramiento. Al Ing. Randal Flores Sánchez, por darme la oportunidad realizar este proyecto en la empresa Grupo Kopar y por todos sus consejos que me brindo para poder sacar adelante este proyecto.

Agradezco enormemente a mi compañera de universidad y de trabajo Daniela Araya León por siempre estar apoyadme, guiándome y por esa gran ayuda en todo lo que necesité para elaborar este proyecto.

Finalmente, agradezco a todos mis compañeros del trabajo y de universidad por haber ayudado en mi formación, en mi experiencia y por todas las palabras de motivación que me guiaron para seguir adelante durante todos los años de mi etapa universitaria.

## Lista de Contenido

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tablas.....	xiii
Lista de Abreviaciones .....	xv
Capitulo 1 Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Definición del problema.....	1
1.3. Síntesis del problema.....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos .....	3
1.5. Estructura del documento .....	4
Capitulo 2 Marco Teórico.....	6
2.1. Visión artificial .....	6
2.1.1. Sensor de visión .....	6
2.1.2. Sistemas de visión.....	7
2.1.3. Distancia focal .....	8
2.1.4. Campo de visión .....	9
2.1.5. Distancia de trabajo.....	10
2.2. Actuadores .....	10
2.2.1. Actuadores lineales .....	11
2.2.2. Actuadores rotativos .....	11
2.3. Robot.....	12

2.3.1.	SCARA .....	12
2.3.2.	Articulados .....	13
2.4.	Protocolos de comunicación industrial .....	14
2.5.	Interfaz Hombre – Máquina .....	14
Capitulo 3	Metodología .....	16
3.1.	Identificación de las necesidades del cliente.....	17
3.2.	Establecimiento de especificaciones objetivo .....	19
3.2.1.	Lista de métricas.....	20
3.2.2.	Elaboración de Matriz de correspondencia y especificaciones.....	23
3.2.3.	Proceso de obtención de información.....	25
3.2.4.	Establecer valores meta y marginales .....	28
3.2.5.	Conclusiones y reflexiones del establecimiento de especificaciones	33
3.3.	Generación de conceptos .....	33
3.4.	Selección del concepto .....	34
3.5.	Prueba de concepto .....	35
3.6.	Validación de concepto .....	35
Capitulo 4	Diagnóstico .....	37
Capitulo 5	Propuesta de solución .....	42
5.1.	Descomposición funcional del sistema.....	42
5.2.	Búsqueda interna y externa .....	45
5.2.1.	Búsqueda Interna .....	45
5.2.2.	Búsqueda Externa .....	47
5.2.2.1.	Candidato a solución del primer subproblema .....	47
5.2.2.2.	Candidato a solución del segundo subproblema.....	48

5.2.2.3.	Candidato a solución del tercer subproblema .....	51
5.2.2.4.	Candidato a solución del cuarto subproblema.....	57
5.3.	Construcción de conceptos .....	62
5.3.1.	Árbol de generación de conceptos .....	63
5.3.1.1.	Recepción de la energía eléctrica .....	63
5.3.1.2.	Activación de procesos y actuadores .....	65
5.3.1.3.	Identificación de señales o instrucciones .....	66
5.3.1.4.	Almacenamiento de datos .....	68
5.3.1.5.	Sistema de visión .....	69
5.3.1.6.	Sistema de Movilización .....	72
5.3.2.	Tablas de combinaciones .....	74
5.4.	Selección de conceptos .....	88
5.4.1.	Proceso de filtrado.....	89
5.4.2.	Evaluación .....	95
5.5.	Propuesta de diseño de prototipo .....	95
5.5.1.	Selección de equipos.....	96
5.5.2.	Diseño mecánico de la estructura.....	108
5.5.3.	Diseño mecánico de la herramienta del robot .....	115
5.5.4.	Diseño del soporte del producto .....	118
Capitulo 6	Validación y análisis del sistema .....	120
6.1.	Aspectos generales .....	120
6.2.	Validación del sistema mecánico .....	121
6.3.	Validación del sistema de visión y de movilización .....	129
6.4.	Validación del sistema completo.....	138

6.5. Indicadores de rentabilidad económica.....	144
6.5.1. Indicadores de rentabilidad económica .....	144
6.5.2. Tasa interna de Rentabilidad (TIR).....	145
6.6. Análisis Económico.....	145
6.7. Conclusiones de la etapa de validación.....	149
Capitulo 7 Conclusiones y recomendaciones .....	151
7.1. Conclusiones .....	151
7.2. Recomendaciones .....	153
Referencias Bibliográficas .....	154
Apéndices y Anexos.....	161
Apéndice A.....	161
Apéndice B.....	162
Apéndice C .....	168
Apéndice D: Tablas de etapas de filtrado .....	170
Apéndice E. Datos de productos.....	174
Apéndice F. Recursos de validación.....	177
Apéndice G. Programación del sistema de visión .....	185
Apéndice H. Programación del Robot T3-B .....	194
Apéndice I. Planos .....	199
Apéndice J. Diagrama eléctrico y de conexiones.....	210

## Lista de figuras

Figura 1.1 Ejemplo de producto. Elaboración propia.....	3
Figura 2.1 Representación de un sensor de visión. [3] .....	7
Figura 2.2 Tabla resumen de diferencias entre sistema y sensor de visión.[4] .....	8
Figura 2.3 Representación de distancia Focal.[6] .....	9
Figura 2.4 Relación entre distancia focal y ángulo de visión [7].....	10
Figura 2.5 Ejemplo de actuador lineal [9] .....	11
Figura 2.6 Ejemplo de un actuador rotativo [10].....	12
Figura 2.7 Ejemplo de robot SCARA [12].....	13
Figura 2.8 Ejemplo de Robot Articulado [12].....	13
Figura 2.9 Ejemplo de HMI [14].....	15
Figura 3.1 Etapas del proceso de Diseño de Ingeniería. [15].....	16
Figura 3.2 Matriz de correspondencia de necesidades y especificaciones. Elaboración propia .....	24
Figura 4.1 Sistema de inspección manual. Elaboración propia .....	37
Figura 4.2 Visualización de la medición de piezas. Elaboración propia .....	38
Figura 4.3 Movimientos de eje en máquina. Elaboración propia .....	39
Figura 4.4 Ejemplo de montaje de los equipos. Elaboración propia.....	40
Figura 5.1 Primera descomposición del problema principal. Elaboración propia ..	42
Figura 5.2 Descomposición funcional del problema principal. Elaboración propia	44
Figura 5.3 Sensor de visión IS2000. [25] .....	52
Figura 5.4 Sensor de Visión IS2800 [26].....	52
Figura 5.5 Sistema de visión IS7000. [28].....	53
Figura 5.6 Sistema de Visión IS8000. [29] .....	54

Figura 5.7 Sistema de visión IS9000. [30].....	55
Figura 5.8 Sistema de visión IS D900. [31] .....	56
Figura 5.9 Escáner 3D IS-L4000. [32] .....	57
Figura 5.10 Pistones. [33] .....	58
Figura 5.11 Deslizadera neumática. [34] .....	59
Figura 5.12 Deslizadera eléctrica. [35].....	60
Figura 5.13 Robot Lineal [36] .....	60
Figura 5.14 Brazo Robótico. [37].....	62
Figura 5.15 Estructura de matriz de generación eléctrica. [38] .....	64
Figura 5.16 Árbol de conceptos de recepción de energía eléctrica. Elaboración propia .....	65
Figura 5.17 Árbol de conceptos de señales de activación de procesos y actuadores. Fuente propia .....	66
Figura 5.18 Árbol de conceptos de identificación de señales o instrucciones. Elaboración propia .....	66
Figura 5.19 Árbol de conceptos de protocolos de comunicación. Elaboración propia .....	68
Figura 5.20 Árbol de conceptos de sistemas de visión. Elaboración propia.....	70
Figura 5.21 Árbol de conceptos del sistema de movilización. Elaboración propia	72
Figura 5.22 Tabla de combinaciones de los conceptos para cada subproblema. Elaboración propia .....	75
Figura 5.23 Tabla de combinación del concepto A. Elaboración propia.....	76
Figura 5.24 Tabla de combinación del concepto B. Elaboración propia.....	77
Figura 5.25 Tabla de combinación del concepto C. Elaboración propia.....	77
Figura 5.26 Tabla de combinación del concepto D. Elaboración propia.....	78

Figura 5.27 Tabla de combinación del concepto E. Elaboración propia.....	78
Figura 5.28 Tabla de combinación del concepto F. Elaboración propia .....	79
Figura 5.29 Tabla de combinación del concepto G. Elaboración propia .....	80
Figura 5.30 Tabla de combinación del concepto H. Elaboración propia.....	80
Figura 5.31 Tabla de combinación del concepto I. Elaboración propia .....	81
Figura 5.32 Tabla de combinación del concepto J. Elaboración propia .....	82
Figura 5.33 Tabla de combinación del concepto K. Elaboración propia.....	82
Figura 5.34 Tabla de combinación del concepto L. Elaboración propia .....	83
Figura 5.35 Tabla de combinación del concepto M. Elaboración propia .....	84
Figura 5.36 Tabla de combinación del concepto N. Elaboración propia.....	84
Figura 5.37 Tabla de combinación del concepto O. Elaboración propia .....	85
Figura 5.38 Tabla de combinación del concepto P. Elaboración propia.....	86
Figura 5.39 Tabla de combinación del concepto Q. Elaboración propia .....	86
Figura 5.40 Tabla de combinación del concepto R. Elaboración propia.....	87
Figura 5.41 Tabla de combinación del concepto S. Elaboración propia.....	88
Figura 5.42 Tabla de combinación del concepto B-E-Q. Elaboración propia .....	93
Figura 5.43 Tabla de combinación del concepto B-E-Q-O. Elaboración propia ....	94
Figura 5.44 Propuesta de diseño mecánico. Elaboración propia .....	96
Figura 5.45 Diferencia de imagen obtenida según iluminación del objeto [39].....	99
Figura 5.46 HMI Cognex Visión View 900. [28].....	102
Figura 5.47 Fuente de alimentación de 24VDC. [41].....	103
Figura 5.48 Protección eléctrica MICO Circuit Protection. [42].....	104
Figura 5.49 Proceso para cálculo de lente. [43] .....	106
Figura 5.50 Resultados de cálculo de lente. [43].....	106

Figura 5.51 Lente MC3-03X macro. [44] .....	107
Figura 5.52 Cortinas de seguridad. [52] .....	108
Figura 5.53 Tipos de materiales para estructura. a) Perfil de aluminio [45] b) Tubo acero inoxidable [46] c) Tubo hierro negro [47]. .....	109
Figura 5.54 Estructura principal. Elaboración propia .....	111
Figura 5.55 Soporte de nivel ajustable. [45] .....	112
Figura 5.56 Soporte para robot y sobremesa. Elaboración propia .....	113
Figura 5.57 Placa adaptadora para Robot. Elaboración propia .....	114
Figura 5.58 Dimensiones generales de la estación de inspección (cotas en mm). Elaboración propia .....	114
Figura 5.59 Dimensiones del ultimo eje del Robot T3-B. [48] .....	115
Figura 5.60 Acople Cámara - Robot: a) Vista superior, b) Vista frontal, c) Vista lateral, d) Vista inferior. Elaboración Propia .....	116
Figura 5.61 Dimensiones del reverso de la cámara IS7802. [28] .....	117
Figura 5.62 Placa adaptadora de la cámara: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista trasera. Elaboración propia .....	117
Figura 5.63 Soporte para producto a inspeccionar. Elaboración propia .....	119
Figura 5.64 Isométrico del soporte para piezas a inspeccionar. Elaboración propia .....	119
Figura 6.1 Propiedades del ensamble soporte del robot, aluminio 6063. Elaboración propia .....	122
Figura 6.2 Análisis de tensión del ensamble soporte del robot T3-B. Elaboración Propia .....	122
Figura 6.3 Análisis de deflexión del ensamble soporte del Robot T3-B. elaboración propia .....	123

Figura 6.4 Análisis de factor de seguridad del ensamble soporte del robot T3. Elaboración propia .....	123
Figura 6.5 Propiedades de la placa soporte del robot T3-B. Elaboración propia.	124
Figura 6.6 Análisis de tensión de la placa soporte del Robot T3-B. Elaboración propia .....	124
Figura 6.7 Análisis de desplazamiento de la placa soporte del Robot T3-B. Elaboración propia .....	125
Figura 6.8 Análisis de factor de seguridad de la placa soporte del Robot T3-B. Elaboración propia .....	125
Figura 6.9 Propiedades del perfil vertical. Elaboración propia.....	126
Figura 6.10 Análisis de tensiones del perfil vertical. Elaboración propia .....	127
Figura 6.11 Análisis de desplazamientos del perfil vertical. Elaboración propia..	127
Figura 6.12 Análisis del factor de seguridad del perfil vertical. Elaboración propia. ....	128
Figura 6.13 Colocación de la pieza: a) Correcto, b) Incorrecto. Elaboración propia .....	129
Figura 6.14 Puntos de captura de imagen. Elaboración propia.....	130
Figura 6.15 Imagen tomada en el punto 1. Elaboración propia .....	131
Figura 6.16 Imagen en el punto 1 con herramienta. Elaboración propia .....	131
Figura 6.17 Imagen tomada en el punto 2. Elaboración Propia.....	132
Figura 6.18 Imagen con herramienta tomada en el punto 2. Elaboración propia	132
Figura 6.19 Imagen obtenida en el punto 3. Elaboración propia .....	133
Figura 6.20 Imagen con herramienta en el punto 3. Elaboración propia .....	133
Figura 6.21 Imagen obtenida en el punto 4. Elaboración propia .....	134
Figura 6.22 Imagen con herramienta en el punto 4. Elaboración propia .....	134
Figura 6.23 Imagen obtenida en el punto 5. Elaboración propia .....	135

Figura 6.24 Imagen con herramienta en el punto 5. Elaboración propia .....	135
Figura 6.25 Visualización en HMI de los resultados de la inspección. Elaboración propia .....	136
Figura 6.26 Prototipo de la estación de inspección. Elaboración propia .....	138
Figura 6.27 Soporte para piezas a inspeccionar. Elaboración propia .....	139
Figura 6.28 Colocación de piezas en el soporte. Elaboración propia.....	139
Figura 6.29 Soporte para acople de cámara y robot. Elaboración propia .....	139
Figura 6.30 Interfaz Usuario Maquina. Elaboración propia .....	143
Figura 6.31 Visualización de resultados en interfaz Usuario Maquina. Elaboración propia .....	143
Figura A.1 Plano con las medidas a inspeccionar de la pieza. Cliente Kopar .....	161
Figura A.2 Tabla de comparación de características de IS2000. [4] .....	162
Figura A.3 Tabla de especificaciones de IS2800. [26] .....	163
Figura A.4 Tabla comparativa de herramientas disponibles en los sistemas de visión. [46] .....	164
Figura A.5 Cuadro comparativo A de especificaciones de sistemas de visión 2D Cognex. [51] .....	165
Figura A.6 Cuadro comparativo B de especificaciones de sistemas de visión 2D Cognex. [51] .....	166
Figura A.7 Tabla de especificaciones IS 3D-L400. [32].....	167
Figura A.8 Especificaciones de Robot SCARA T3-B Epson. [48].....	168
Figura A.9 Especificaciones UR3e. [37] .....	169
Figura A.10 Tabla comparativa modelos IS7000. [28].....	174
Figura A.11 Especificaciones Serie TB. [12] .....	175
Figura A.12 Especificaciones serie LSB. [12].....	175

Figura A.13 Especificaciones Serie RS. [12].....	175
Figura A.14 Especificaciones Serie GX. [12].....	176
Figura A.15 Especificaciones Serie G. [12].....	176
Figura A.16 Tiempos de ciclo obtenidos del programa del robot. Elaboración Propia .....	183
Figura A.17 Cuadro generado con la información al almacenar los datos de inspección. Elaboración propia.....	184
Figura A.18 Bloque de calibración de la imagen. Elaboración propia .....	185
Figura A.19 Bloque de medición del borde derecho. Elaboración propia .....	186
Figura A.20 Bloque de búsqueda de la primera vuelta separada. Elaboración propia .....	187
Figura A.21 Bloque de conteo de vueltas. Elaboración propia.....	188
Figura A.22 Bloque de búsqueda de la última vuelta separada. Elaboración propia .....	189
Figura A.23 Bloque de búsqueda del borde izquierdo. Elaboración propia.....	190
Figura A.24 Bloque de cálculo de distancias A - B - C. Elaboración propia .....	191
Figura A.25 Bloque de cálculo de distancias E - Total, Comunicación con el robot, Visualización de los datos completos. Elaboración propia .....	192
Figura A.26 Bloque Almacenamiento y envío de datos. Elaboración propia .....	193
Figura A.27 Programación Robot bloque 1. Elaboración propia.....	194
Figura A.28 Programación Robot bloque 2. Elaboración propia.....	195
Figura A.29 Programación del Robot bloque 3. Elaboración propia.....	196
Figura A.30 Programación del Robot bloque 4. Elaboración propia.....	197
Figura A.31 Programación del Robot bloque 5. Elaboración propia.....	198
Figura A.32 Programación del Robot Bloque de comunicación con sistema de visión. Elaboración Propia .....	198

Figura A.33 Diagrama eléctrico de conexiones. Elaboración propia ..... 210

## Lista de Tablas

Tabla 3.1 Tabla de necesidades del cliente según su importancia relativa. ....	18
Tabla 3.2 Lista de métricas para las necesidades del cliente. ....	21
Tabla 3.3 Valores marginales y aceptables para cada métrica establecida. ....	29
Tabla 5.1 Especificaciones del robot lineal Intelliaxis H-Bot. ....	61
Tabla 5.2 Tabla comparativa de lenguajes. ....	67
Tabla 5.3 Tabla comparativa de protocolos de comunicación. ....	69
Tabla 5.4 Tabla comparativa de sistemas de visión. ....	71
Tabla 5.5 Tabla comparativa de sistema de movilización. ....	73
Tabla 5.6 Criterios de selección. ....	90
Tabla 5.7 Comparación de modelos de SCARA. ....	101
Tabla 6.1 Medidas de referencia de la pieza evaluada. ....	137
Tabla 6.2 Porcentaje de error en la medición de la pieza en la prueba de repetividad. .....	137
Tabla 6.3 Valores de referencia de piezas evaluadas. ....	140
Tabla 6.4 Porcentajes de error de las piezas inspeccionadas. ....	141
Tabla 6.5 Tiempos de ciclo de las 10 iteraciones. ....	142
Tabla 6.6 Gastos de inversión inicial de equipos del proyecto. ....	146
Tabla 6.7 Gastos de inversión administrativa inicial del proyecto. ....	147
Tabla 6.8 Cuadro resumen de inversión del proyecto por parte de Kopar Costa Rica. .....	147
Tabla 6.9 Cálculo de flujos netos de efectivos para Kopar Costa Rica. ....	148
Tabla 6.10 Necesidades y confirmación de su cumplimiento. ....	150
Tabla A.1 Etapa de filtrado #1. ....	170
Tabla A.2 Proceso de filtrado #2. ....	171

Tabla A.3 Proceso de filtrado #3 .....	172
Tabla A.4 Evaluación de conceptos .....	173
Tabla A.5 Iteraciones de colocación de pieza en el soporte. ....	177
Tabla A.6 Resultados de repetividad de Sistema de visión.....	178
Tabla A.7 Resultados de validación del sistema de inspección completo Pieza 1. .....	179
Tabla A.8 Resultados de validación del sistema de inspección completo Pieza 2. .....	180
Tabla A.9 Resultados de validación del sistema de inspección completo Pieza 3.	181
Tabla A.10 Resultados de validación del sistema de inspección Pieza 4. ....	182

## Lista de Abreviaciones

CAD	Computer-aided Design.
cm	Centímetros.
HMI	Human Machine Interface.
IP	Internet Protocol.
kg	Kilogramo.
m	Metro.
min	Minuto.
Mp	Megapíxeles.
N	Newton.
OCR	Optical Character Recognition.
OPC UA	Open Platform Communications United Architecture.
PROFINET	Process Field Network.
rev	Revolución.
SCARA	Selective Compliance Articulated Robot Arm.
TCP	Transmission Control Protocol.
V	Voltios.

## Capítulo 1 Introducción

### 1.1. Antecedentes

Este proyecto se desarrolló en el laboratorio de Kopar Latinoamericana, S.A. la cual fue fundada en 1983 en México, es experta en soluciones de automatización industrial y distribuidores industriales de productos de robótica, visión, conectividad y neumática. [1]

En Costa Rica se abrió una sede en el año 2000 donde se realiza este proyecto, dicha compañía se distribuyen equipos de marcas como Epson, Universal Robots, Cognex, PHD, MAC, Murr Elektronik, SICK, Siemens, Bimba, entre otros y brindan su servicio a diferentes empresas del país. [1] Además de ser distribuidor de las marcas antes mencionadas, la función de Kopar es ayudar a dar soluciones a problemáticas que se presenten en empresas clientes en el área de la automatización, ya sea realizando visitas a las empresas para revisar las aplicaciones y dar recomendaciones de soluciones o también realizando pruebas en el laboratorio para llegar a una solución con los equipos que distribuye.

Este proyecto se desarrolla en el área de inspección de calidad, donde se revisa parte de la producción de la empresa con el fin de verificar la calidad y que cumplan con los estándares que se imponen. Dicho esto, en el laboratorio de Kopar es donde se realizarán las pruebas necesarias para que la propuesta presentada sea la más adecuada para solucionar el problema.

### 1.2. Definición del problema

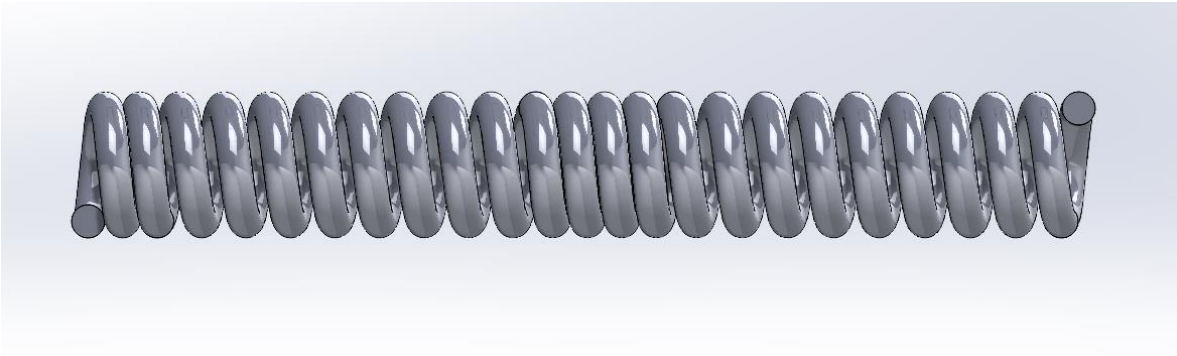
La empresa Kopar al tener un rol de distribuidor en el área de automatización y robótica industrial, trabaja de la mano con muchas empresas para poder automatizar diferentes procesos. Varias de estas empresas están enfocadas en el

ámbito médico y con esto trabajan piezas que deben cumplir muchas especificaciones y precisiones con rangos muy pequeños de aceptación.

Muchos de estos productos con los que se trabajan y con los que llegan a Kopar para implementar una solución en el área de inspección son embobinados y cables que en su mayoría son de diámetros pequeños, menores a 1mm y de longitud variable, por lo que se busca una solución estándar para facilitar las pruebas y así mejorar la exactitud de la inspección, la calidad del embobinado debido a que la incertidumbre es baja y se deben realizar mediciones adecuadamente, pero el problema más importante que presentan es su alto tiempo de inspección por pieza en sus estaciones de medición, por lo cual desean disminuirlo significativamente introduciendo un equipo automatizado.

También se desea optimizar el tiempo que se dura en entregar una solución, acortando el tiempo que se invierte en realizar las pruebas de factibilidad, lo cual incluye el armado del equipo, configuración, realización de la prueba y demostración al cliente. En promedio se toma alrededor de una semana para realizar las pruebas de factibilidad en el laboratorio, por esta razón se desea diseñar esta estación para disminuir el tiempo de entrega de una solución automatizada a las empresas clientes.

En la figura 1.1 Se puede observar un ejemplo del tipo de productos que llegan al laboratorio para realizarse las pruebas de inspección. En este caso se hacen mediciones de longitudes, diámetros y distancia entre vueltas. Es importante mencionar que cada inspección que se realiza a los productos puede variar según las especificaciones de los clientes.



*Figura 1.1 Ejemplo de producto. Elaboración propia.*

Además del ejemplo de la Figura 1.1 también hay casos donde solo es un cable uniforme de diámetro pequeño con diferentes marcas en todo su cuerpo, inspecciones como esas requieren saber distancias entre marcas, longitudes y cantidad de marcas. Este tipo de inspecciones puede variar según las especificaciones de cada cliente.

### 1.3. Síntesis del problema

Disminuir el tiempo que duran en inspeccionar los productos tipo embobinado y cables en sus estaciones los clientes de la empresa.

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo General

- Diseñar una estación de un sistema automatizado de inspección de embobinados y cables.

#### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar el sistema de inspección actual para obtener los requerimientos.
- Diseñar un sistema mecánico para inspección de los productos a examinar.

- Implementar el sistema de visión capaz de realizar la inspección y mecanismo para su movilización.
- Desarrollar un sistema de comunicación entre el sistema de visión y el mecanismo de movilización.
- Validar mediante un prototipo el diseño de la estación de inspección.

## 1.5. Estructura del documento

En el primer capítulo se hace una introducción hacia el proyecto que se realiza, se trata de información básica sobre el tipo de producto junto con sus parámetros y el proceso que se desea llevar para su inspección, además de la problemática a solucionar en el desarrollo del proyecto y los objetivos fundamentales para considerar una ejecución exitosa.

En la sección Marco Teórico se describen todos los conceptos junto con su explicación que se consideran necesarios para la comprensión del proyecto a ejecutar.

En la Metodología se detalla todos los métodos por los que se pasa la realización del proyecto, todo esto basado en el proceso de diseño de ingeniería para la mejor ejecución de su desarrollo y así justificar todas las decisiones que se tomaran para llegar a la solución.

Luego en la propuesta de diseño, se presentan los diseños para los diferentes sistemas con los que contara la solución al problema planteado, todo esto para cumplir cada una de las necesidades que puedan salir de la metodología.

Posteriormente se tiene la sección de resultados y análisis, donde se presentan todos los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, después se ejecuta un análisis de dichos resultados donde podremos verificar si el sistema propuesto es una solución válida al problema propuesto.

Después de obtener los resultados y sus respectivos análisis se tiene la sección de conclusiones y recomendaciones, donde basado en dichos resultados se muestra el alcance del proyecto junto con sus debidas recomendaciones que se deben evaluar para un futuro si se desea realizar algún cambio en el diseño.

En el capítulo de referencias bibliográficas se presentan las diferentes fuentes consultadas para la realización del documento.

Finalmente, en la sección del apéndices y anexos se expresan los cálculos, resultados y diferentes documentos importantes para la realización del documento que ayudan a comprender de una mejor manera todo el proceso que se llevó para desarrollar dicho proyecto.

## Capítulo 2 Marco Teórico

### 2.1. Visión artificial

La visión artificial consiste básicamente en la deducción automática de la estructura y propiedades de un mundo tridimensional, posiblemente dinámico, a partir de una o varias imágenes bidimensionales de ese mundo. En esta área de conocimiento se aúnan conceptos de la física del color, óptica, electrónica, geometría, algorítmica, sistemas de computación, etc. [2]

Por medio de esta visión artificial es como se pueden hacer inspecciones de diferentes tipos a cualquier objeto con el cual se desea trabajar. Existen sistemas con visión artificial que son utilizados en la industria para cumplir con el propósito de hacer inspecciones muy simples o inspecciones complejas. Algunos ejemplos de este tipo de inspección son: Encontrar bordes, realizar mediciones de longitudes, verificar presencia/ausencia de componentes, lectura de códigos, lectura de caracteres en posiciones complejas, conteo de piezas y localización de objetos.

#### 2.1.1. Sensor de visión

Los sensores de visión, que no deben confundirse con los sensores digitales que se encuentran dentro de las cámaras, son un tipo de solución de visión artificial diseñada para realizar comprobaciones simples de presencia/ausencia y proporcionar inspecciones de aprobación/rechazo en situaciones no estructuradas. [3]. En la Figura 2.1 se representa un sensor de visión de una forma simplificada donde se tiene el sensor, un objeto que se desea inspeccionar y una iluminación procedente del sensor.

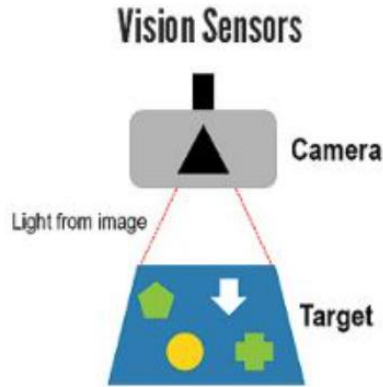


Figura 2.1 Representación de un sensor de visión. [3]

La capacidad de una cámara para tomar imágenes es combinada con la capacidad de procesamiento de una computadora esto con el fin de poder generar resultados relacionados con la ubicación y calidad de un producto. Otra característica de los sensores de visión es que estos pueden detectar productos o paquetes por patrones, color u otras características, además de poder manejar diferentes tareas al mismo tiempo a diferencia de un sensor común. A continuación, se definirán conceptos relacionados a la visión necesarios para realizar una inspección.

### 2.1.2. Sistemas de visión

Un sistema de visión se asemeja mucho a los sensores de visión descritos en el punto anterior, la diferencia es que los sistemas de visión vienen con algoritmos más robustos en las herramientas que contienen. Por ejemplo, los sistemas de visión además de ubicar piezas por patrones, identificar colores y demás, también cuentan con herramientas de ubicación, guiado, mediciones, alineación y reconocimiento óptico de caracteres u OCR (Optical Character Recognition) como es conocido comúnmente en la industria. Por estas razones se diferencian un sensor y un sistema de visión, en la Figura 2.2 se puede observar una tabla resumen lo antes mencionado.







		Vision Sensors	2D Vision Systems
	Presence/Absence	✓	✓
	Inspection	✓	✓
	Guide/Align		✓
	OCR/OCV	✓	✓
	Code Reading		✓
	Gauge/Measure		✓

Figura 2.2 Tabla resumen de diferencias entre sistema y sensor de visión.[4]

Es importante mencionar que existen diferentes tipos de sistema de visión, cada uno basado a las diferentes necesidades que puedan existir en las aplicaciones en la industria tales como: tiempo de inspección, tamaño de objeto que se desea inspeccionar, resolución, herramientas necesarias para la inspección y así como lectura de códigos.

### 2.1.3. Distancia focal

Según [5] la distancia focal es la distancia que existe entre el foco y el centro óptico de la lente. Como se observa en la Figura 2.3 se representa la distancia focal como la longitud a la que se obtiene el punto de la imagen enfocada o mejor dicha donde se puede observar con claridad y no en un estado borroso, del lente utilizado.

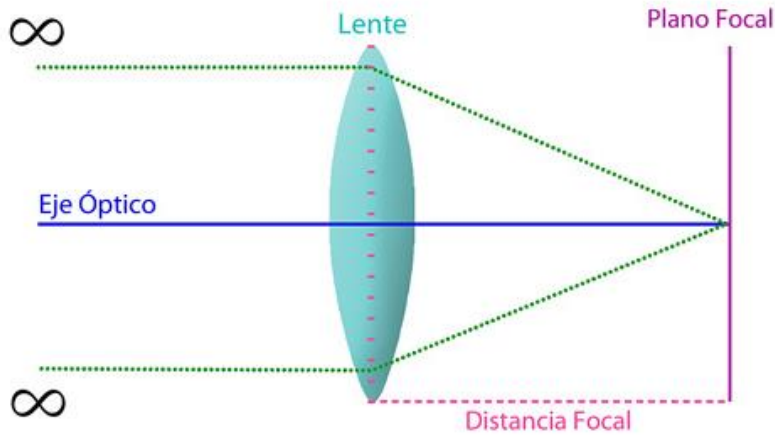


Figura 2.3 Representación de distancia Focal.[6]

Los lentes utilizados por las cámaras seleccionan dependiendo de su distancia focal, debido a que esta característica afecta la amplitud de la imagen que recibe y así su campo de visión.

#### 2.1.4. Campo de visión

El campo de visión como bien su nombre lo indica es el área que puede captar la cámara. Esto es afectado según la distancia focal del lente y el tamaño del sensor que posee la cámara. Por ejemplo, teniendo una distancia constante y se utiliza una distancia focal pequeña, más amplio es el campo de visión y viceversa. En la Figura 2.4 podemos observar una representación del campo de visión o ángulo de visión según la distancia focal, esto representa cuanto puede cambiar la distancia donde se enfoca el objeto y el ángulo de visión según el campo de visión que se desee para la inspección.

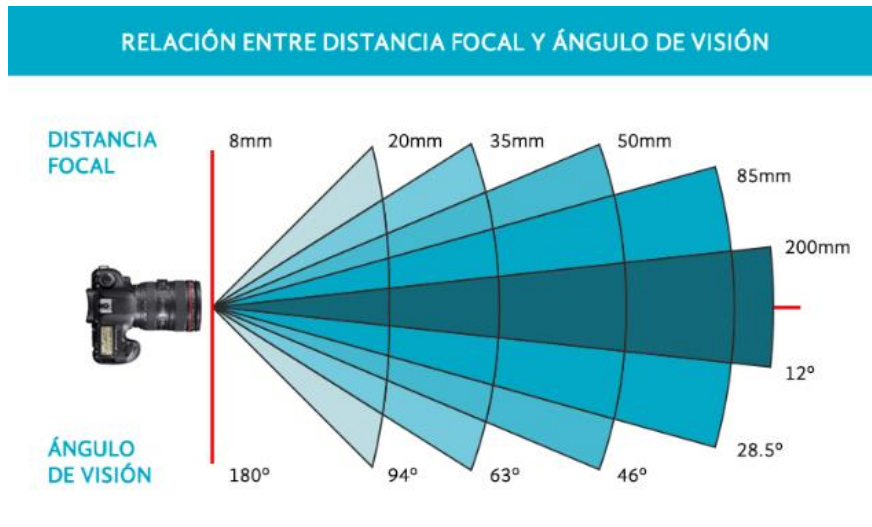


Figura 2.4 Relación entre distancia focal y ángulo de visión [7]

### 2.1.5. Distancia de trabajo

La distancia de trabajo es la longitud de separación entre el lente de una cámara y el objetivo que se quiere fotografiar. La distancia de trabajo también afecta el campo de visión que puede tener una cámara.

Es importante mencionar que la distancia de trabajo puede ser establecida por un cliente debido al espacio que tiene en la máquina para instalar el equipo, ya que, si se cuenta con solo 30cm entre el equipo y las piezas a inspeccionar, esto afectará la escogencia del lente y su respectiva distancia focal.

## 2.2. Actuadores

Un actuador es un dispositivo inherente mecánico cuya función es proporcionar una fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico [8]. Existen diferentes tipos de actuadores, cada uno nombrado por el tipo de movimiento que realizan, de igual manera cada uno de ellos puede ser accionado por 3 diferentes fuentes: presión neumática, presión hidráulica o fuerza motriz eléctrica. Pueden llamarse “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico” dependiendo de la fuente que lo acciona. También existen combinaciones

como los electroneumáticos, que son los actuadores que funcionan por medio de la presión del aire, pero la señal de activación se da de forma eléctrica.

A continuación, se definen varios tipos de actuadores que pueden ser de importancia para este proyecto.

### 2.2.1. Actuadores lineales

Como se mencionó anteriormente, los actuadores pueden tener diferentes fuentes de actuación. En este caso los actuadores lineales son los que, transforman un tipo de movimiento (rotativo o lineal) en un movimiento de forma lineal sobre otro objeto. En la Figura 2.5 se puede observar un ejemplo de un actuador lineal estándar.



*Figura 2.5 Ejemplo de actuador lineal [9]*

Este tipo de actuadores son muy utilizados en la industria para realizar diferentes tipos de operaciones a lo largo de una producción, ya sea solo el hecho de mover un objeto unos pocos centímetros en una dirección.

### 2.2.2. Actuadores rotativos

Al igual que los actuadores lineales, los rotativos transforman un movimiento ya sea lineal o rotativo en un movimiento final de rotación. Un ejemplo de este tipo de actuadores son los motores y servomotores, aunque también existen los actuadores rotativos neumáticos. A continuación, en la Figura 2.6 se observa un ejemplo de un actuador rotativo eléctrico como lo es un servomotor.



Figura 2.6 Ejemplo de un actuador rotativo [10]

## 2.3. Robot

Un robot es una máquina automática programable capaz de realizar determinadas operaciones de manera autónoma y sustituir a los seres humanos en algunas tareas. [11] Los robots son utilizados en especial cuando se requiere realizar una tarea repetitiva, pesada o peligrosa, también pueden contar con diferentes tipos de sensores o accesorios que faciliten la aplicación que realizan.

En la actualidad para el ambiente industrial lo que se utilizan son los robots industriales que son utilizados en las empresas para realizar diferentes tareas donde quieren automatizar el proceso por diferentes motivos, uno de los más importantes es que un robot puede realizar tareas sin necesidad de que su trabajo se vea afectado por las horas activas a diferencia de un humano que puede llegar a cansarse y afectar el trabajo. Los robots industriales pueden categorizarse principalmente en dos tipos.

### 2.3.1. SCARA

Los robots industriales tipo SCARA cuentan con 3 o 4 grados de libertad, son especialmente utilizados para aplicaciones de *Pick and Place* debido a que trabajan solamente en un plano, además cuentan con altas velocidades y realizan actividades repetitivas. Sus siglas significan *Selective Compliance Assembly Robot Arm* o brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo en español. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo del robot tipo SCARA.



*Figura 2.7 Ejemplo de robot SCARA [12]*

### 2.3.2. Articulados

Los robots articulados generalmente se utilizan cuando se necesita trabajar en más de un plano, por lo que necesita tener más de 4 grados de libertad. Este tipo de robot generalmente cuenta con 6 grados de libertad, lo que ayuda a simular un brazo humano, gracias a esto sus ejes suelen llevar el nombre de las articulaciones de un brazo: base, hombro, codo, muñeca 1, muñeca 2 y muñeca 3. Se utilizan para realizar aplicaciones con movimientos complejos, diferentes velocidades y diferencias de esfuerzos. En la Figura 2.8 se puede observar un ejemplo del tipo de robot articulado, en este caso uno de la marca Epson.



*Figura 2.8 Ejemplo de Robot Articulado [12]*

## 2.4. Protocolos de comunicación industrial

Los sistemas de comunicación industrial son un mecanismo de transmisión de datos o información entre los diferentes niveles de la pirámide de automatización necesarios para llevar a cabo tareas de control y gestión en un proceso, se puede entender como protocolo como el convenio o conjunto de reglas que permite el intercambio de información entre diferentes dispositivos. [13]

Existen diferentes protocolos de comunicación industrial, algunos de estos tipos son: Industrial Ethernet, Profinet, Profibus, Modbus, entre otros.

Es importante mencionar que para este proyecto se necesita un protocolo de comunicación para la interacción de los componentes y encargados de enviar y recibir datos para su interpretación.

## 2.5. Interfaz Hombre – Máquina

Un HMI o la interfaz Hombre – Máquina por sus siglas en inglés, es la interfaz entre un operario y la parte de la máquina que está realizando el proceso, básicamente se trata de un panel de visualización e instrumentos para que el operario pueda interactuar con la maquinaria.

Existen diferentes tipos de interfaces las cuales dependen del tipo de aplicación en la cual se va a necesitar o la localidad donde se encuentra. En las empresas productoras generalmente se utilizan HMI industriales, las cuales son robustos y tienen la capacidad de que el operario pueda además de visualizar información también puedan introducir valores, activar opciones o ajustar parámetros por medio de una pantalla táctil.

Con este tipo de HMI se puede hacer una verificación gráfica por parte del operario de los resultados obtenidos en la inspección de este proyecto. En la Figura 2.9 se puede observar un ejemplo de un HMI de la marca Advantech.

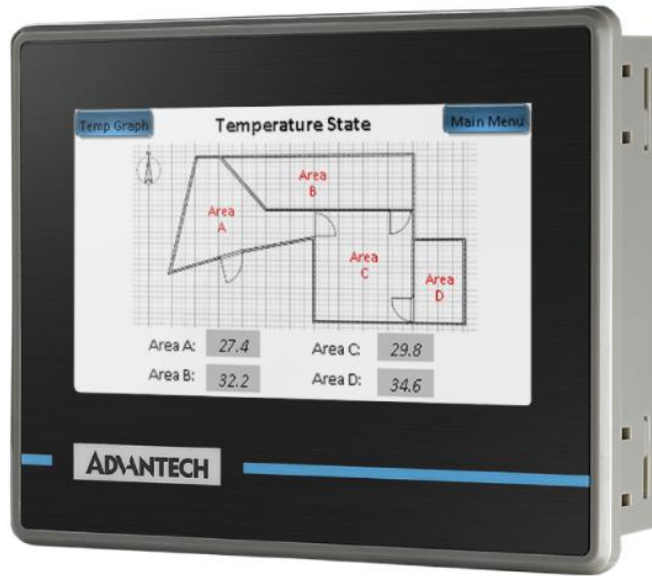


Figura 2.9 Ejemplo de HMI [14]

## Capítulo 3 Metodología

Como se mencionó anteriormente, en este capítulo se muestra toda la información con relación al proceso general por el cual se desarrolló el proyecto. En este caso el método a utilizar para su implementación es el método de diseño de ingeniería como se muestra en la Figura 3.1.

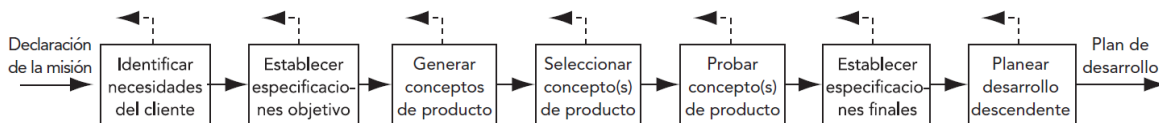


Figura 3.1 Etapas del proceso de Diseño de Ingeniería. [15]

En la primera etapa se debe realizar una descomposición del problema principal el cual se planteó en la Descripción del Problema anteriormente, en subproblemas que permitan identificar las necesidades o requerimientos de cada uno de ellos para poder atacarlos individualmente y de una manera más sencilla y así escalar al desarrollo de la solución.

Después avanzamos a la siguiente etapa donde ya identificadas y comprendidas las necesidades, se procede a formular posibles soluciones que están disponibles. Junto con eso se debe caracterizar cada una de ellas para justificar la selección de cada solución a cada subproblema.

Cuando se plantean las posibles soluciones se pueden comparar entre sí y escoger una en específico para cada subproblema, así luego se genera una combinación de ellas para dar finalmente con una solución general del problema que sea capaz de cumplir con cada una de las necesidades previamente planteadas.

Finalmente, en la última etapa se da la verificación y pruebas de las soluciones escogidas según cada una de las necesidades planteadas inicialmente.

Es importante recordar que el método de diseño de ingeniería es un proceso iterativo por lo que se debe de tomar en cuenta que en cualquier momento se puede dar un paso atrás para llegar a mejor resultado si no se cumple con alguna de las necesidades en una de las soluciones seleccionadas. Esto hace que este método sea una buena práctica no solo para este proyecto si no para cualquier tipo de proyecto de diseño y desarrollo.

### 3.1. Identificación de las necesidades del cliente

Esta etapa tiene como objetivo identificar cada una de las necesidades del cliente además de plantear un punto de partida para el proyecto, también se desea desarrollar un entendimiento entre el cliente y la persona a desarrollar la solución para que las necesidades sean totalmente comprendidas por las dos partes.

Para identificar de las necesidades del cliente se deben realizar los siguientes pasos:

- Recopilar datos sin procesar del cliente.
- Interpretar los datos sin procesar en términos de las necesidades del cliente.
- Organizar las necesidades en una jerarquía de las necesidades primarias, secundarias y de ser necesario, terciarias.
- Establecer la importancia relativa de las necesidades.

En esta primera fase se obtienen las necesidades del sistema, después de obtenidas se procede a dividir las en subproblemas para descomponer el problema principal en pequeños segmentos donde se puedan ir resolviendo poco a poco hasta llegar a una solución general del sistema.

Al conversar con el asesor de la empresa se obtienen las siguientes necesidades:

- La inspección a realizar debe cumplir con las especificaciones del plano.

- El sistema debe ser capaz de inspeccionar productos de diámetro entre 0.5mm y 1mm.
- El sistema debe inspeccionar la longitud del producto.
- El sistema debe ser automatizado.
- El proceso de inspección completo debe ser menor a 2 minutos.
- Los componentes deben ser de fácil conexión.
- Se debe contar con un interfaz usuario – máquina para visualización de la inspección.
- El sistema debe contar con salidas digitales para el Pasa/Falla de la inspección.
- Se debe contar con un sistema de sujeción o base para colocar el producto lo más parecido en todas las inspecciones.
- El sistema debe ser capaz de almacenar los datos.

Con la información recopilada del asesor de la empresa se procede a generar la Tabla 3.1 donde se realiza una clasificación de las necesidades según la importancia de cada una. Se asignan valores desde el 1 como valor de menor importancia hasta el número 5 como mayor importancia.

Tabla 3.1 Tabla de necesidades del cliente según su importancia relativa.

Número	Necesidad	Importancia relativa
1	La inspección a realizar debe cumplir con las especificaciones del plano.	5
2	El sistema debe ser capaz de inspeccionar productos de diámetro entre 0.5mm y 1mm.	5
3	El sistema debe inspeccionar la longitud del producto.	4
4	El sistema debe ser automatizado.	4
5	El proceso de inspección completo por pieza debe ser menor a 2 minutos.	5

6	Los componentes deben ser de fácil conexión.	1
7	Se debe contar con un interfaz usuario – máquina para visualización de la inspección.	2
8	El sistema debe contar con salidas digitales para el Pasa/Falla de la inspección.	4
9	Se debe contar con un sistema de sujeción o base para colocar el producto lo más parecido en todas las inspecciones.	4
10	El sistema debe ser capaz de almacenar los datos	3

Según la tabla anterior se puede observar que la necesidad de mayor importancia debe ser cumplir con los requerimientos de medición de los productos a inspeccionar debido a que es de gran importancia ya que formarán parte de dispositivos médicos. A partir de ahí se ve como la importancia disminuye con respecto a características más técnicas como la interfaz humano – maquina.

### 3.2. Establecimiento de especificaciones objetivo

Luego de identificadas cada una de las necesidades descritas mediante entrevistas se logra comprender de mejor manera cada una de ellas y así la mejora que busca el cliente, se procede al establecimiento de especificaciones objetivos. Con esto se pretende explicar lo que debe realizar el producto con descripciones detalladas. Dichas especificaciones están conformadas por una métrica que se le debe asignar un valor con respecto a su importancia en cada parte del proyecto.

Es importante que se deben plantear con respecto a soluciones para cada subproblema que se derivó del problema general. En esta etapa debe considerarse diferentes soluciones por cada una de las necesidades y además caracterizar cada uno de ellos para así poder elegir el que cumpla de la mejor manera con la necesidad.

Los pasos a seguir en esta etapa son los siguientes:

- Elaborar lista de métricas.
- Elaborar la matriz de selección.
- Proceso de obtención de información
- Establecer valores meta y marginales
- Conclusiones y reflexiones.

### 3.2.1. Lista de métricas

Para dar inicio con la matriz de selección primero se debe elaborar una lista de métricas donde se compara el grado de satisfacción de cada una de las especificaciones con respecto a su necesidad. A continuación, se presenta la lista de métricas iniciales:

- Distancias de medición según el plano. En el Anexo A se puede observar el plano de la pieza.
- Diámetros de inspección pequeños.
- Rango de movilidad del sistema de movimiento.
- Rango de medición de vueltas del embobinado.
- Distancia entre la cámara y el producto.
- Voltaje de alimentación del sistema.
- Fuente del sistema de movilización.
- Tiempo de ciclo.
- Facilidad de interacción Humano – Máquina.
- Señal de Pasa/Falla.
- Cantidad de piezas a inspeccionar por ciclo.
- Tipo de comunicación entre los dispositivos.
- Posicionamiento correcto de las piezas.
- Almacenamiento de datos de inspecciones buenas y malas.

Completada la lista de métricas se procede a asignar la importancia para cada métrica según su necesidad asociada. Además, se agregan las unidades con las que se mide cada una de ellas. En la Tabla 3.2 podemos ver la lista de métricas con la información ordenada.

Tabla 3.2 Lista de métricas para las necesidades del cliente.

N° Métrica	N° Necesidad	Métricas	Import.	Unidades
1	1,3	Distancias de medición según el plano.	5	mm
2	1,2	Diámetros de inspección pequeños	5	mm
3	3	Rango de movilidad del sistema de movimiento.	5	mm
4	1	Rango de medición de vueltas y espaciado del embobinado.	5	Rev.
5	3	Distancia entre la cámara y el producto.	4	mm
6	4	Voltaje de alimentación del sistema.	3	V
7	4	Fuente del sistema de movilización.	3	Adimensional
8	5	Tiempo de ciclo.	5	min
9	4,6,7	Facilidad de interacción Humano – Máquina	3	Adimensional
10	7,8	Señal de Pasa/Falla.	4	Binario
11	9	Cantidad de piezas a inspeccionar por ciclo.	4	Adimensional
12	10	Tipo de comunicación entre los dispositivos.	3	Adimensional
13	9	Posicionamiento correcto de las piezas.	4	%
14	10	Almacenamiento de datos de inspecciones buenas y malas.	2	Binario

Fuente: Elaboración propia.

Para el siguiente paso se procede a relacionar las métricas de la tabla anterior con su respectiva necesidad a cumplir.

Para empezar la necesidad 1 corresponde a cumplirse con las métricas 1, 2 y 4, las cuales están totalmente relacionadas a todas las especificaciones de los productos según su plano, longitudes a inspeccionar y conteo de vueltas del embobinado, esto en cada una de las secciones que se desee realizar las mediciones.

La necesidad 2 hace relación a la métrica 2, sobre la cual debe de inspeccionar los productos de diámetros pequeños como los mencionados anteriormente en las necesidades.

La necesidad 3 corresponden a las métricas 1, 3 y 5, las cuales hacen referencia a la inspección sobre toda la longitud, distancias y campo de visión del producto, el cual debe llevarse a cabo de manera cuidadosa para cumplir con las especificaciones de longitud.

Luego la necesidad 4 se relaciona con las métricas 6, 7 y 9, donde son meramente características que debe cumplir el sistema como alimentación, tipo de fuente de actuación, interacción humano – maquina, para tener un sistema automatizado como el que se desea realizar según los requerimientos del cliente.

La necesidad 5 se cumple con la métrica 8, donde se relaciona con una de las necesidades más importantes del sistema y el cumplir con el tiempo de inspección deseado por cada una de las piezas.

La necesidad 6 se satisface con la métrica 9, donde se debe tener una interacción entre el operario y la máquina lo más fácil posible, sin tener que recurrir a realizar complicados pasos para que la maquina realice las inspecciones.

Seguidamente la necesidad 7 se relaciona con las métricas 9 y 10, esto porque se muestra cómo se va a visualizar la señal de aprobación o rechazo de cada pieza inspeccionada para los operarios.

Para la necesidad 8 se tiene la métrica 10, donde se debe contar con un tipo de señal pasa/falla para cuando se da la revisión de cada producto en la máquina.

Continuando con la necesidad 9 viene a cumplirse con respecto a las métricas 11 y 13, se relaciona con respecto al posicionamiento y cantidad de piezas que se desean inspeccionar al mismo tiempo por ciclo de la máquina.

Finalmente, la necesidad 10 se cumple con respecto a la métrica 12 y 14, se relaciona con todos los puntos sobre el almacenamiento de datos sobre las inspecciones por si se desea realizar un análisis profundo de cada una de las mediciones ejecutadas.

### 3.2.2. Elaboración de Matriz de correspondencia y especificaciones

Con respecto al inciso anterior se procede a generar una matriz de correspondencia de necesidades y especificaciones. Esta matriz ayuda a que sea más fácil observar la relación de cada una de las métricas con las necesidades esto debido a que puede darse el caso donde una necesidad tenga varias métricas relacionadas o el caso contrario una métrica tenga varias necesidades relacionadas. Por esto en la Figura 3.2 se puede observar la creación de esta matriz de correspondencia.

Necesidades		Métricas														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	La inspección a realizar debe cumplir con las especificaciones del plano.	•	•		•											
2	El sistema debe ser capaz de inspeccionar productos de diámetro entre 0.5mm y 1mm.		•													
3	El sistema debe inspeccionar la longitud del producto.	•		•		•										
4	El sistema debe ser automatizado.						•	•		•						
5	El proceso de inspección completo por pieza debe ser menor a 30 segundos.								•							
6	Los componentes deben ser de fácil conexión.									•						
7	Se debe contar con un interfaz usuario – máquina para visualización de la inspección.									•	•					
8	El sistema debe contar con salidas digitales para el Pasa/Falla de la inspección.										•					
9	Se debe contar con un sistema de sujeción o base para colocar el producto lo más parecido en todas las inspecciones.											•		•		
10	El sistema debe ser capaz de almacenar los datos												•		•	

Figura 3.2 Matriz de correspondencia de necesidades y especificaciones. Elaboración propia

Se procede a realizar un análisis del resultante de la matriz de correspondencia. Donde se observan diferentes casos como los antes mencionados.

En el caso de las necesidades 1, 3, 4, 7, 9 y 10 tienen asociada más de una métrica. Esto indica que para satisfacer de la mejor manera estas seis necesidades

de debe de cumplir la mayor cantidad de métricas posibles asociadas a cada una de ellas.

La importancia del punto anterior lo podemos visualizar en un ejemplo utilizando la necesidad 1, donde dice que el sistema de inspección debe cumplir con las especificaciones del plano esto con respecto a longitudes y conteo de vueltas, esta necesidad debe cumplir con las métricas 1, 2 y 4. Si solo se cumpliera con la 1 y no con la 2 y 4, el sistema podría hacer mediciones de distancia como longitudes pero no sería capaz de inspeccionar estas dimensiones en productos de diámetro menos a 1mm ni tampoco realizar el conteo de las vueltas del embobinado ni la distancia de espaciamiento entre ellas.

Este tipo de casos como el mencionado en el punto anterior, debe de cumplir con la mayor cantidad de métricas para poder considerar la necesidad como completada.

El otro tipo de caso que se puede tener es cuando una necesidad está relacionada a solo una métrica. En este caso el cumplimiento de la métrica asegura el 100% de la resolución de la necesidad.

Un ejemplo del caso anterior es la necesidad 5, donde se desea que el sistema cumpla con un ciclo menor a 2 minutos por cada pieza a inspeccionada. Al cumplir con la métrica 8 de tiempo de ciclo se va a completar en su totalidad la necesidad asociada.

### 3.2.3. Proceso de obtención de información

En esta sección se muestra la información disponible con la que se cuenta para cada una de las métricas, esta información es procedente de conversaciones pasadas con el cliente como también de otras fuentes que muestran datos de interés para el diseño de este sistema como planos e información adicional.

- **Distancia de medición según el plano:** Se conversó con el asesor de la empresa Kopar sobre la necesidad de este sistema de inspección para reducir el tiempo de ciclo en cada una de sus inspecciones para las empresas cliente. Una de las cosas más

importantes es apegarse totalmente a la inspección de las piezas según el plano de referencia para constatar que la producción del producto se dio como se debía con respecto a las longitudes y demás especificaciones.

- **Diámetros de inspección pequeños:** Las piezas para las que está pensada esta estación tiene la peculiaridad de que tienen una longitud mucho más grande que su ancho (diámetro en la mayoría de los casos), esto siendo así que la longitud es de varios centímetros y su ancho puede estar en un rango de 0.5mm a 1mm por lo que su relación sería alrededor de 100:1. Con esto el asesor de la empresa desea que el sistema sea capaz de hacer inspecciones milimétricas en piezas de este diámetro pequeño.
- **Rango de movilidad del sistema de movimiento:** Como se menciona en el punto anterior la relación entre longitud y ancho es alrededor de 100:1 por lo que según se conversó con el asesor de la empresa se necesita un sistema de movilización ya sea para la pieza o para el sistema de visión con el que se va a realizar la inspección porque no es probable que la pieza no se pueda inspeccionar con todo configurado de manera estática.
- **Rango de medición de vueltas y espaciado del embobinado:** en algunos casos como lo es en la prueba en la que se basa este proyecto, se debe contar la cantidad de vueltas del embobinado en cierto tramo del producto junto con el espaciado que hay entre estas.
- **Distancia entre la cámara y el producto:** Es importante para la estación tener en cuenta la distancia que hay entre la cámara del sistema de visión y el producto porque esto afecta el campo de visión y así las mediciones que pueden realizarse por cada foto que se toma en la inspección.
- **Voltaje de alimentación del sistema:** Para Kopar es importante que las soluciones que entregan a sus clientes cumplan con ciertas

facilidades como lo es el voltaje que utilizan los equipos y los tipos de voltaje más comunes que se utilizan en las fábricas. Por este motivo se requiere que los equipos utilizados en este sistema de inspección cumplan con voltajes de 5V, 24V, 120V o 240V.

- **Fuente del sistema de movilización:** El sistema de movilización que se va a utilizar también es importante que sea accionado por una fuente de fácil acceso tanto como en Kopar como en las empresas clientes que la mayoría son del ámbito médico, por esta razón se desea que sea de carácter neumático o eléctrico ya que son de las fuentes más fáciles de acceder, eficientes y además limpias.
- **Tiempo de ciclo:** El sistema debe ser capaz de superar el tiempo de inspección de un operario en una inspección manual. Además, las empresas siempre buscan un tiempo de ciclo bajo ya que esto ayuda a que los productos finalizados salgan de producción de manera rápida y no así ralentizar sus líneas de producción. El tiempo de ciclo deseado para esta inspección debe ser menor a 2 minutos que dura una persona experimentada en realizar la inspección.
- **Facilidad de interacción Humano – Máquina:** es importante que este sistema tenga un nivel alto en la facilidad de que los trabajadores puedan interactuar con el equipo. Esto para que su funcionamiento sea fluido junto con el de las inspecciones y no aparezcan problemas por dificultad de uso.
- **Señal de Pasa/Falla:** Para los sistemas de inspección es necesario saber el resultado, ya sea interno o por medio una señal que indique si la pieza fabricada cumple con todos los requisitos de una pieza buena o si falla. En este caso es importante contar con una señal que indique si las piezas inspeccionadas están bien o están mal, para ya sea proceder a un sistema de descarte o simplemente para llevar el control de los productos.
- **Cantidad de piezas a inspeccionar por ciclo:** La cantidad de piezas a inspeccionar a la vez es importante porque agiliza el proceso de

inspección. Cuando se realiza una inspección manual se da da en casos de uno en uno, con este sistema se espera que de manera automatizada se puedan colocar varios productos para que se inspecciones en un ciclo de trabajo de la máquina y no como el caso de uno en uno.

- **Tipo de comunicación entre dispositivos:** De igual manera es importante que este sistema utilice protocolos de comunicación industriales que sean normalmente utilizados en el mercado, entre ellos están los más comunes como ethernet, ethernet/IP, Profibus, Modbus, Serial, entre otros.
- **Posicionamiento correcto de las piezas:** E este sistema se espera que haya algún tipo de fijador o posicionado que asegure que las piezas estén colocadas de la mejor manera para garantizar que el proceso de inspección se dé de la mejor manera sin tener que estar ajustando el equipo ni el producto durante el proceso de inspección.
- **Almacenamiento de datos de la inspección:** Es muy común que las empresas desee que los resultados de las inspecciones se puedan extraer y puedan almacenarse en algún lugar de los dispositivos electrónicos como computadores, esto para realizar un análisis de los resultados ya sea por si hay muchas piezas que están fallando en el mismo defecto poder hacer la corrección en la máquina encargada de la fabricación o también para tener una base de datos de todos los defectos que pueden aparecer y su porcentaje en los procesos de producción.

#### 3.2.4. Establecer valores meta y marginales

Completada la lista de métricas iniciales y junto con los datos recopilados en conversaciones con el asesor de la empresa se procede a generar la tabla de valores meta con los valores aceptables. El valor meta hace referencia al mejor resultado que se puede esperar de la métrica o mejor dicho los valores deseados.

El valor marginal o valor aceptable por otro lado viene siendo el valor o rango de valores donde la métrica se hace factible como solución.

Estos valores marginales o aceptables deben de escogerse con mucho cuidado debido a que más adelante donde se desarrolla la solución puede ser que no se cumpla totalmente el valor ideal, sin embargo, deberá de cumplir al menos con los valores seleccionados como aceptables para concluir que la métrica se cumplió y así mismo la necesidad se satisfizo.

En la Tabla 3.3 podemos ver la comparación de los valores ideales con los aceptables.

Tabla 3.3 Valores marginales y aceptables para cada métrica establecida.

Nº Métrica	Métricas	Valores Ideales	Valores Aceptables
1	Distancias de medición según el plano	Dim. A= 79mm Dim. B= 3mm Dim. E= 75mm	79 ( $\pm 2$ ) mm 3 ( $\pm 1$ ) mm 75 ( $\pm 2$ ) mm
2	Diámetros de inspección pequeños	[0.5mm,1mm]	$d < 1.0 (\pm 0.1)$ mm
3	Rango de movilidad del sistema de movimiento	160 mm	155 ( $\pm 5$ ) mm
4	Rango de medición de vueltas y espaciado del embobinado	Dim C = 10 Vueltas en 1.854mm	10 Vueltas en 1.854 ( $\pm 0.100$ )
5	Distancia entre la cámara y el producto	$\leq 200$ mm	$< 150$ mm
6	Voltaje de alimentación del sistema	24 V, 110V, 240 V	24 V,120V, 240V
7	Fuente del sistema de movilización	Aire comprimido, Electricidad	Aire comprimido, Electricidad
8	Tiempo de ciclo	$< 2$ min	$< 2$ min
9	Facilidad de interacción Humano – Máquina	Utilizable por cualquier persona	Utilizable por personal capacitado

10	Señal de Pasa/Falla	Si	Si
11	Cantidad de piezas a inspeccionar por ciclo	> 1	[2,5]
12	Tipo de comunicación entre los dispositivos	Ethernet, Ethernet/IP, Salidas digitales, Profibus.	Ethernet, Ethernet/IP, Salidas digitales, Profibus
13	Posicionamiento correcto de las piezas	100%	90%
14	Almacenamiento de datos de inspecciones buenas y malas	Si	Si

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer los valores marginales de la métrica 1 “Distancias de medición según el plano” Se utilizan de referencia las medidas que se solicita que debe cumplir el producto según las especificaciones de planta para el producto con el que se basa este proyecto (embobinado tipo figura 1.1) dicho plano se puede observar en el apéndice A. debido a que este es un producto para un dispositivo médico es de suma importancia que estos parámetros se cumplan. Esto también aplica para la métrica 2 “Diámetros de inspección pequeños” y la métrica 4 “Rango de medición de vueltas y espaciado del embobinado”.

Para la métrica 3 “Rango de movilidad del sistema de movimiento” comentando con el asesor de la empresa que cuenta con gran experiencia en sistemas de visión, comentó que para poder inspeccionar piezas con tales dimensiones de se debe tener en cuenta que cualquier sistema de visión a elegir no será capaz realizar toda la inspección con un campo de visión que abarque toda la pieza como tan, por esta razón se necesita que el sistema de visión o el producto tengan la capacidad de desplazarse para que si se pueda llevar a cabo la inspección en diferentes fotografías.

La métrica 5 “Distancia entre la cámara y el producto” viene siendo una restricción junto con la métrica de poder inspeccionar diámetros pequeños debido a

que depende mucho la distancia entre cámara y producto o distancia de trabajo del lente que se utilizara y el campo de visión que se desee. Además, de eso también se debe tener en cuenta si sería el sistema de visión o el producto que va a realizar el movimiento porque depende del sistema de movilización también la altura a la que se puede estar de la pieza. Según experiencias anteriores del asesor, comenta que se puede tener una distancia de trabajo menor a los 200mm por el tipo de producto que se desea inspeccionar.

La métrica 6 “Voltaje de alimentación del sistema” se desea que los dispositivos que se utilizarán en el sistema de inspección automático cuenten con un voltaje de alimentación estándar de las plantas productoras de dispositivos. En este caso la mayoría de empresas trabajan con alimentaciones de 24V, 120V o 240V para poner en marcha sus máquinas y dispositivos, además, de que también los dispositivos en el laboratorio de Kopar utilizan esas alimentaciones.

Para la métrica 7 “Fuente del sistema de movilización” se toma en cuenta que los productos que se desean inspeccionar son para empresas medicas donde la limpieza cuenta un gran papel en sus plantas de producción, por esta razón la fuente de del sistema de movilización debe ser “limpia”, esto significa que no deje suciedad en la maquina ni en los productos. Debido a esto se desea que el sistema de movilización sea neumático o eléctrico ya que estas dos opciones no dejan ningún tipo de contaminante sobre los productos.

La métrica 8 “Tiempo de ciclo” es uno de los parámetros más importantes porque es con el que las empresas desean mejorar pasando de un sistema manual a un sistema automático, una de los requerimientos más comunes de los clientes al solicitar una inspecciona automática es que el sistema sea competitivo y mejor a un operario. De esta manera se solicita que el tiempo por inspección por pieza sea de menos de 2 minutos.

La métrica 9 “Facilidad de interacción Humano – Máquina” se establece porque la maquina debe ser de fácil uso y capaz de ser utilizado por cualquier persona, como métrica marginal se establece que sea una persona capacitada

porque siempre hay que tener en cuenta cuidados de la máquina, así como instrucciones de funcionamiento para que se opere de la mejor manera.

Para la métrica 10 “Señal de Pasa/Falla” es necesaria ya que en cualquier proceso de inspección se desea saber si los productos analizados cumplen con los requisitos que utiliza la planta para la fabricación de ellos, por los que en este caso es deseable que exista algún tipo de señalamiento de si la pieza aprobó o falló en el proceso de inspección. En este caso puede ser cualquier tipo de señal, ya sea una señal digital, una señal visual en el HMI o una luz.

La métrica 11 “Cantidad de piezas a inspeccionar por ciclo” se agrega debido a que como se mencionó anteriormente, los clientes cuando buscan una maquina automatizada para realizar el proceso de inspección quieren que este sea una mejora con respecto al sistema que se maneja actualmente que viene siendo por operarios inspeccionando una pieza a la vez. Por este motivo se desea que el sistema pueda realizar inspecciones a más de un producto por ciclo de trabajo.

Para la métrica 12 “Tipo de comunicación entre los dispositivos” se debe de manejar un protocolo de comunicación industrial al igual que en la métrica 6 sea estándar en las empresas de producción para la comunicación de los equipos entre sí, en este caso se desea que tenga al menos un tipo de protocolo de comunicación como los mencionados en la sección 2.4.

La métrica 13 “Posicionamiento correcto de las piezas” se propone debido a que el tipo de producto al ser un embobinado no siempre se cuenta con que mantenga su forma, por esta razón se propone un dispositivo donde se puedan colocar los productos que mantenga la pieza de la mejor manera para realizar las inspecciones sin que se altere su forma en la que está posicionada.

Finalmente, la métrica “Almacenamiento de datos de inspecciones buenas y malas” es orientada a que las empresas generalmente desean tener un registro de las inspecciones para realizar análisis o llevar cierta trazabilidad de los procesos de fabricación de los componentes. Por esta razón desean que los resultados de las inspecciones se puedan almacenar de alguna forma en el sistema o se pueda sustraer la información.

### 3.2.5. Conclusiones y reflexiones del establecimiento de especificaciones

En este proceso de la determinación de especificaciones es importante también considerar los productos que ya existen en el mercado esto debido a que facilita la creación de las métricas y determinar sus valores ideales y marginales.

También es importante analizar de manera profunda todas las conversaciones y datos proveídos por el asesor de la empresa en este caso siendo el cliente para determinar de forma completa las métricas ideales y aceptables en este proceso de diseño.

Finalmente podemos concluir de esta sección lo importante que es la generación de las métricas para las necesidades que se quiere solucionar, esto debido a que al final del diseño se compara los resultados finales con respecto a las métricas marginales para poder considerar el sistema diseñado como una solución factible a la problemática planteada.

### 3.3. Generación de conceptos

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto [15]. Es una etapa clave para el proceso de diseño pues a partir de este punto es donde se representan las soluciones posibles para el problema planteado. Por esta razón se debe contemplar la mayor cantidad de posibilidades en este punto, así de todas las opciones de busca la mejor que cumpla con todas las necesidades.

Esta etapa se pueden considerar cinco pasos a seguir:

Aclarar el problema, esto quiere decir entenderlo desde todos los puntos, descomponer el problema para simplificarlo y luego enfocarse en cada uno de las partes críticas que se tienen los subproblemas.

Buscar externamente, buscar soluciones de parte de usuarios líderes, expertos en el mercado, patentes, literatura... todas las fuentes externas que ya tengan una solución funcional y existente a los subproblemas.

Buscar internamente, si no existe una solución externa llega el momento donde internamente se debe solucionar el problema por parte de diseño individual o en equipo.

Explorar sistemáticamente, se hace una recolección de datos de lo que se encontró tanto internamente como externamente, de ahí se explora todas las soluciones posibles y plantearlas de diferentes maneras para organizarlas, unos ejemplos pueden ser un árbol de clasificación de conceptos o una tabla de combinación de conceptos.

Por último, Reflexionar sobre las soluciones y el proceso, donde se realiza una retroalimentación constructiva de todo el proceso realizado y las soluciones encontradas. Es importante tener en cuenta que esta reflexión debe realizarse en todo el proceso de diseño y desarrollo.

### 3.4. Selección del concepto

La selección de concepto es el proceso donde se evalúan los conceptos obtenidos en la etapa anterior con respecto a los requerimientos y necesidades del cliente, esto se hace comparando los puntos críticos y débiles de los conceptos y seleccionando uno o más para la prueba y desarrollo del sistema.

Para el método estructurado se cuentan con diferentes pasos que ayudan a cumplir con el objetivo de esta etapa. Para esta etapa hay diferentes métodos que se pueden aplicar, puede ser uno no estructurado por ejemplo pueden ser decisión externa, campeón del producto, intuición o pros y contras, o un método ya estructurado que puede ayudar a la selección del concepto.

Para el método estructurado se cuentan con diferentes pasos que ayudan a cumplir con el objetivo de esta etapa. En este caso se utiliza para reevaluar, combinar, mejorar o descartar conceptos que cumplen en menor o ninguna parte las necesidades del cliente y con esto poder obtener una mejor solución al problema.

- Definir los criterios de selección.
- Evaluar los conceptos.
- Ordenar y seleccionar los conceptos.
- Combinar y mejorar los conceptos.
- Seleccionar uno o más conceptos.

### 3.5. Prueba de concepto

Al determinar cuál de los conceptos es el que satisface de mejor manera las necesidades del cliente se procede a realizar una prueba de concepto. En este caso como se trata de una estación de inspección para diferentes tipos de productos, se debe adaptar a una situación específica que en este caso sería el análisis de un embobinado, con eso se darían como satisfechas las necesidades si se logra cumplir las métricas definidas en la sección 3.2.4.

La prueba de concepto se realiza mediante la creación de un prototipo para evaluar si cumple con las necesidades planteadas. Esto se logra por medio de diseño mecánico, *software* CAD, programación del sistema de visión, acoplamiento del sistema de movilidad y demás, para garantizar que el prototipo es funcional y considerar lo como un diseño definitivo.

Los apartados 3.3, 3.4 y 3.5 que corresponden a la generación de conceptos, selección del concepto y prueba de concepto se desarrollan más adelante en el Capítulo 5.

### 3.6. Validación de concepto

Una de las etapas finales del proceso de diseño de ingeniería en el cual es basado este proyecto, es el proceso de validación. Es donde se determina la funcionalidad del prototipo elaborado a base de los conceptos mejor acoplados a las necesidades del cliente.

Para la validación de este proyecto se realizan las mediciones de varias muestras de un mismo producto brindado por una empresa cliente de Kopar para la realización de esta solución. Donde se comparará las mediciones y resultados obtenidos con respecto a tiempos, distancias y demás contra las especificaciones dadas por el cliente y planteadas en métricas en la sección 3.2.4. Esta etapa de validación se desarrolla en el Capítulo 6 de este informe.

## Capítulo 4 Diagnóstico

En este capítulo se puede ver el análisis del tipo de mecanismo de inspección que se ha trabajado para los productos con los que llegan a la empresa Kopar para buscar un método automatizado y mejorar el tiempo de inspección que es lo que se desea principalmente en este proyecto.

Por parte de la mayoría de empresas que contactan a Kopar para que se brinde una solución automatizada del proceso de inspección, se utiliza un método de medición manual donde el operario toma la pieza (en este caso un embobinado) y lo coloca en una base plana y procede a inspeccionarlo en una maquina como la que se muestra en la Figura 4.1, para realizar la medición.



Figura 4.1 Sistema de inspección manual. Elaboración propia

Esta medición se realiza de forma manual, esto quiere decir que el operario introduce la pieza bajo el lente de la máquina, esta cuenta con un lente especial llamado “macro”, con este tipo de lente se pueden visualizar objetos de tamaños pequeños. Cuando el producto está bajo el lente, el operario procede a ajustar el enfoque para ver la imagen con mayor claridad hasta el punto que crea conveniente para iniciar con las mediciones. En la Figura 4.2 se observa cómo se visualiza el producto siendo inspeccionado en la pantalla del equipo, es importante mencionar que cada operario realiza una medición que puede variar según el punto donde la inicie o donde la termine, ya que el método es muy visual y sin tener una referencia clara de los rangos donde se inicia o termina la inspección.



*Figura 4.2 Visualización de la medición de piezas. Elaboración propia*

Cuando se decide iniciar las mediciones el operario mueve una de las perillas con las que cuenta la máquina para desplazarse en el eje “X” a lo largo de la pieza, deteniéndose en donde se encuentren los diferentes puntos de inspección con el que cuente la pieza. Esta máquina también cuenta con una perilla que mueve el eje “Y” de la pieza, por si se da el caso de que la pieza no quede colocada en el punto

“0” del eje vertical, por lo que deben de ajustar la pieza manualmente con el uso de esta perilla. En la Figura 4.3 se observa la máquina utilizada para realizar la inspección con las perillas señaladas para el movimiento de su respectivo eje.



Figura 4.3 Movimientos de eje en máquina. Elaboración propia

Como estos equipos están diseñados para tener una precisión de hasta tres decimales, cada vuelta a la perilla equivale a una longitud pequeña, por este motivo el tiempo de inspección se vuelve muy alto por cada una de las piezas, sin mencionar el tiempo que le lleva al operario en hacer las mediciones de conteo de vueltas, distancia entre cada vuelta en cierta parte de la pieza donde deben estar separadas como se muestra en el plano del apéndice A. Además, también se debe sumar el tiempo que se dura en enfocar la pieza y su correcta colocación para poder iniciar con la inspección de una sola pieza. En una visita a la planta se recolecto la información de que sumando el tiempo de los procesos antes mencionados a una persona experimentada le toma 2 minutos realizar una inspección completa de un

embobinado, mientras que a una persona con poca experiencia le puede tomar hasta 4 minutos.

Por parte de Kopar cada vez que se realiza este tipo de pruebas de factibilidad se debe determinar qué tipo de equipos son los que mejor se adaptan a la prueba a ejecutar, además de eso se debe buscar un lugar adecuado donde se pueda realizar la colocación de equipos. En este caso el lugar donde se colocan los equipos depende del tipo de prueba a realizar y el tipo de equipos que se necesita. Los lugares más habituales donde se realizan las pruebas es en el escritorio del ingeniero o una mesa de trabajo como se puede observar en la Figura 4.4.



*Figura 4.4 Ejemplo de montaje de los equipos. Elaboración propia*

Cuando se finaliza una prueba se necesita desarmar los equipos demostrativos para poder realizar la siguiente. Debido a no contar con un lugar fijo donde se realizan las pruebas, el resultado de esta puede variar cuando se hace el desarme de los equipos y el ensamble nuevamente. En este caso la frecuencia de

los productos médicos tipo embobinados y cables es alta, alrededor de dos pruebas por semana es que se desea mantener una estación fija para la ejecución de este tipo de experimentos.

Cabe destacar que los equipos que se utilizan durante la prueba puede variar por algún motivo debido a que no se logra obtener el resultado deseado o también el equipo si es el que se necesita, pero se requiere hacer ajustes en la iluminación, colocación de las piezas, altura de los componentes, campos de visión, entre otros factores que sean importantes y ameriten realizar un cambio.

## Capítulo 5 Propuesta de solución

A continuación, en este capítulo se realiza todo el proceso de las secciones 3.3, 3.4 y 3.5, donde se identifican y comparan las posibles soluciones al problema que se plantea inicialmente, con el fin de encontrar una solución final que sea la idea al acatar cada uno de las métricas y así satisfacer las necesidades del cliente.

### 5.1. Descomposición funcional del sistema

Teniendo en cuenta el problema principal el cual se basa en la creación de una estación automatizada de inspección de cables in embobinados con el fin principal de entregar una solución a los clientes que pueda acortar el tiempo de inspección significativamente, y también tomando en cuenta las necesidades y especificaciones identificadas en las primeras etapas del proceso de diseño (secciones 3.1 y 3.2) se propone la descomposición del problema principal en subproblemas más simples para poder resolver cada uno de ellos y obtener una solución general del problema.

En este punto iniciaremos por presentar la función principal como un todo en una caja negra para una mejor comprensión de los subproblemas que se desean resolver para el funcionamiento correcto del mismo.



Figura 5.1 Primera descomposición del problema principal. Elaboración propia

En la Figura 5.1 podemos observar la primera descomposición del problema principal, del lado izquierdo se aprecia las entradas al sistema que vienen siendo las necesidades principales del sistema. En el caso del material se tiene los objetos que se van a inspeccionar, en este caso el objeto es un producto tipo embobinado.

Además, tenemos otras dos entradas, donde la segunda sería el tipo de energía que se utiliza, ya sea para energizar los equipos como también la fuente de movimiento para el sistema movilizador encargado de mover el sistema de visión o el objeto a inspeccionar. La tercera sería la señal de control con la que daría inicio a la inspección cuando las piezas estén posicionadas correctamente.

Del lado derecho tenemos las salidas deseadas del sistema, como primera tenemos el material, este viene siendo el material ya inspeccionado y listo con sus respectivos resultados. En la segunda salida tenemos movimiento mecánico, donde después de iniciado el proceso se debe dar el movimiento del sistema de movilización para realizar la inspección. Por último tenemos una salida llamada señal, este incluye todo lo que viene relacionado a el movimiento del sistema, Activación del sistema de visión, resultado de la inspección, tiempos de ciclo, entre otros.

El siguiente paso es descomponer el problema principal que lo representamos en la imagen anterior como una caja negra, en diferentes subproblemas que podemos atacar individualmente para facilitar la solución. En la figura 5.2 se puede observar ese proceso.

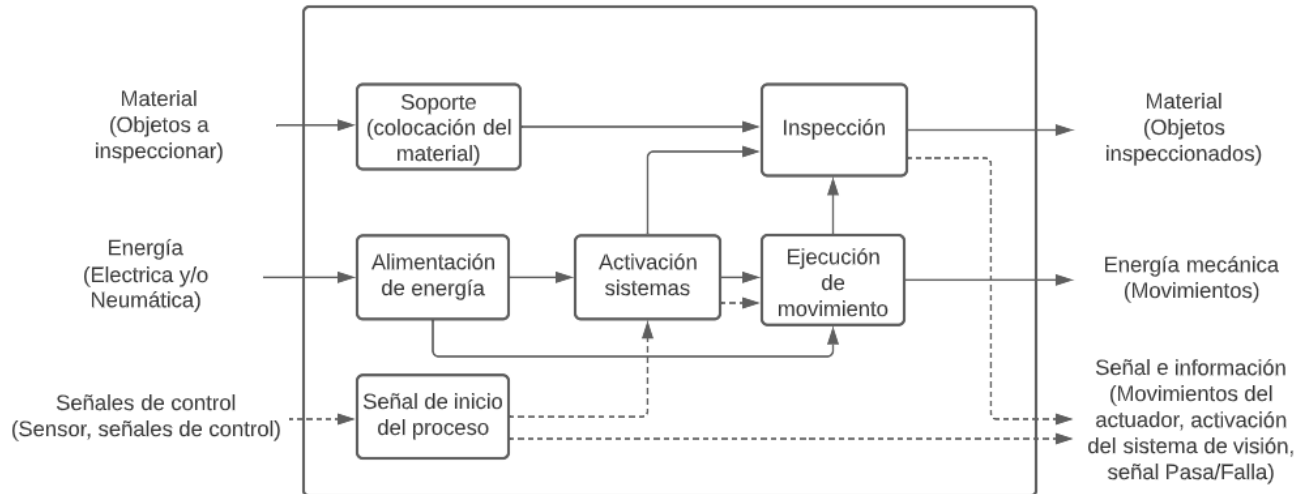


Figura 5.2 Descomposición funcional del problema principal. Elaboración propia

En la Figura 5.2 se puede observar la agrupación de las funciones en subproblemas. Se identifican 5 subproblemas principales: Proporción de energía, Control del sistema, Movimiento del sistema y Proceso de inspección.

Dentro del primer subproblema que encontramos “Proporción de energía”, se relaciona la forma de proporcionar la energía a todos los sistemas relacionados en la solución.

El segundo subproblema está relacionado a las señales de activación del sistema, las señales para iniciar el desplazamiento del sistema de movilidad, las señales de interpretación de la información resultante del sistema de inspección, manejo de las variables a interpretar en la programación. Como se puede observar es un subproblema que tiene relación con todo el sistema en general.

El tercer subproblema se relaciona con todo el proceso de inspección de las piezas, el tipo de sistema de visión que se va a necesitar, la resolución, las herramientas de inspección, el tipo de lente, la distancia de trabajo, el campo de visión, entre otros.

Por último, el cuarto subproblema viene relacionado al tipo de movilización que va a tener el sistema basado en los objetos que se van a movilizar, el tipo de movimiento a realizar, los rangos operacionales, el tipo de fuente para su

movimiento, entre otros. Este subproblema junto con el tercero, indicara el tiempo necesario para la inspección total de las piezas, siendo esto una de las necesidades principales a resolver para el cliente.

## 5.2. Búsqueda interna y externa

A continuación, en esta sección se realiza una búsqueda exhaustiva sobre posibles soluciones a los subproblemas planteados y a partir de la combinación de cada una de las soluciones se forman las posibles propuestas de concepto para el producto.

### 5.2.1. Búsqueda Interna

Para esta etapa se solicita una reunión con los ingenieros involucrados en el proyecto, en este caso con el asesor de la empresa y además la ingeniera de aplicaciones para producir una lluvia de ideas con las que se puedan resolver los subproblemas planteados. El punto de esta lluvia de ideas es conseguir cualquier idea que pueda funcionar, hasta las ideas que puedan parecer incoherentes pueden aportar algunos detalles de utilidad, de la forma que se planteo fue para cada subproblema imaginando el proceso que se debería seguir para la inspección. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la lluvia de ideas:

- 1. Colocación del producto a inspeccionar:** Después de la lluvia de ideas se analizaron los resultados y se llegó a la conclusión de que los productos se pueden colocar en varios tipos de fijadores. Depende del tipo y forma de fijador el que pueda tener un mejor resultado para que el dispositivo siempre se encuentre de la mejor manera para su inspección sin tener que estar acomodándolo.
- 2. Corregible:** Para este caso se determinó que el tipo de sistema de movilidad debe ser capaz de corregir su movimiento en caso de que el dispositivo que se colocó no esté en la posición deseada para su inspección. Esto por ejemplo si el embobinado por alguna razón no

está colocado de una manera horizontal, el sistema debe ser capaz de seguir el recorrido del producto para su correcta inspección.

- 3. Repetitividad:** El sistema debe ser capaz de repetir los mismos resultados al inspeccionar diferentes productos del mismo tipo. Esto se puede realizar de manera que dentro del movimiento del sistema no haya ningún tipo de colisión, que la muestra se encuentre colocada de manera correcta y que el sistema de visión este configurado de la mejor manera.
  
- 4. Funcionamiento continuo:** El diseño de este sistema debe considerar que su funcionamiento sea de la forma correcta y ser capaz de funcionar por largos periodos de tiempo debido a que en las plantas generalmente se trabajan turnos largos. En este caso no se considera un tiempo máximo de funcionamiento, pero si debe de tomarse en cuenta.
  
- 5. Diseño para piezas similares:** Dado que este proyecto está basado para un producto de embobinado, también se analiza que debe estar diseñado para productos similares como los son los cables (mismo patrón de diámetros pequeños con longitudes grandes).
  
- 6. Demostrativo:** El sistema debe ser capaz de cumplir con demostraciones de manera fundamental ya que en este punto es donde se pueda apreciar que el diseño es capaz de realizar las inspecciones correspondientes y puede funcionar en planta.
  
- 7. Adaptable:** También se llegó al acuerdo de que el sistema debe ser adaptable en sentido de si hay algún tipo de cambio en el producto o la inspección a realizar, este debe ser de fácil cambio de programación para ajustarse a los diferentes cambios que puedan ocurrir.

### 5.2.2. Búsqueda Externa

En la siguiente etapa se considera empezar por buscar soluciones completas o parciales a cada uno de los subproblemas generales planteados en la sección 5.1 donde se dio la descomposición funcional del sistema. El tipo de soluciones que se buscan en este punto son las ya existentes en el mercado y demás. Esta búsqueda se hace por medio de sitios web, artículos, tesis, patentes y cualquier artículo que pueda dar una solución a alguno de los subproblemas.

#### 5.2.2.1. Candidato a solución del primer subproblema

En este caso se inicia atacando el subproblema numero uno sobre la proporción de energía eléctrica. El tipo de solución buscada en este punto es de donde se puede obtener energía eléctrica para alimentar los equipos.

- **Energía eléctrica:** Según [16] es la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos (cuando se los pone en contacto por medio de un conductor eléctrico) y obtener trabajo.
- **Energía hidroeléctrica:** se obtiene de tomar el agua de una o varias fuentes (ríos, lagos, etc.) con su masa y velocidad, el agua hace girar las turbinas de los cuartos de máquinas para convertir la energía potencial en rotacional y de este modo en eléctrica. [16]
- **Energía térmica:** En este grupo caben todas las plantas generadoras que utilizan como fuente primaria el calor proveniente de los combustibles [16]. En este caso los principales elementos para obtener la energía térmica son: una caldera, una turbina y un alternador que sería el responsable de transformar a energía eléctrica.

- **Energía geotérmica:** se produce en plantas que utilizan el vapor de agua, almacenado bajo la superficie de la tierra. En su estado natural a esta fuente de energía se le llama energía calórica o geotérmica, que luego es transformada en energía eléctrica. [16]
- **Energía eólica:** Es la energía que se puede obtener proveniente de la fuerza del viento [16]. Para este método lo que se utiliza con las turbinas que se movilizan mediante el viento, al generar este movimiento rotacional por medio de un generador se transforma en energía eléctrica.

#### 5.2.2.2. Candidato a solución del segundo subproblema

Para el segundo subproblema se consideran soluciones para cada uno de los tipos de señales que se van a generar para diferentes puntos del problema general como lo son las señales de activación de los dispositivos, señales para la identificación de resultados, señales para la interpretación de instrucciones y señales para el almacenamiento de datos.

1. **Señal para activación de dispositivos:** Entiéndase que para este tipo de señal se incluye la activación para los procesos, ya sea inspección, sistema de movilización y demás que incluyan los diferentes dispositivos que se utilizan en el proyecto. Según [17] existen dos tipos de métodos más comunes para transmitir información con eficiencia, estos son las señales analógicas y las digitales, pero en cada caso de una forma específica.
  - Las **señales digitales** son aquellas de uso más frecuente debido a su flexibilidad y polivalencia. La forma de transmitir información por medio de señales digitales es el uso de un lenguaje binario, que sería la utilización de los números 0 y 1.

- Las **señales analógicas** son las utilizadas para transmitir señales físicas a señales eléctricas, por medio del uso de ondas de tipo senoidal.

**2. Señales de interacción Humano - Máquina:** En este apartado se identifican las diferentes formas como un operario podría activar la máquina. Es importante tener en cuenta todas las opciones por las cuales se puede realizar una interacción entre el operario y la estación de inspección.

- Para iniciar se toma como base un sistema básico como lo es la activación de un sensor, botón o dispositivo físico por el cual se envía una señal de activación hacia el equipo.
- También existe la opción de utilizar un sistema más completo como lo es un HMI donde se cuenta con una pantalla táctil donde se pueden agregar botones de activación para procesos, pero también es capaz de mostrar el proceso de inspección deseado.

**3. Interpretación de señales:** En este punto se identifica la manera que se va a interpretar las instrucciones o resultados de las inspecciones para realizar el proceso completo de inspección y movilización del sistema automatizado. Existen diferentes formas de programas un controlador, algunas opciones según [18] son las siguientes:

**Lenguajes de texto o bajo nivel:**

- **Lista de instrucciones:** Emplea instrucciones de mando que el procesador obedece siempre y cuando exista la parte operacional (lo que va hacer) y el operando que da respuesta a la operación. [18]

- **Texto estructurado:** se utiliza para codificar expresiones aritméticas complejas con valores analógicos y digitales, dispone de estructuras para bucles, funciones y condicionales, soporta ciclos de interacción y particularmente alterna letras mayúsculas y minúsculas en su código. [18]

#### **Lenguajes gráficos o de alto nivel:**

- **Diagrama de escalera:** Este es el lenguaje de interface gráfica más utilizado en campo, su nombre se debe a su forma estructural semejante a una escalera por donde corren dos relés verticales llamados Lógica 1 y 2. [18]
- **Diagrama de bloques:** Es utilizado para la representación gráfica de un proceso mediante símbolos lógicos, su elemento más característico son los bloques de función que albergan las variables que transformarán la secuencia. [18]
- **Diagrama de funciones secuenciales:** Es una representación diagramática de secuencias de control en un programa en el que se pueden organizar subrutinas o etapas que van afectando el producto de las funciones posteriores. [18]

**4. Almacenamiento de datos:** Según la necesidad se desea almacenar los datos de los resultados de la inspección, por esto se debe tomar en cuenta que tipo de protocolo de comunicación es el que se desea implementar para enviar los datos y así su almacenamiento. Como se puede observar en [19] y [20] los protocolos que son candidatos a esta solución son:

- OPC UA, Velocidad 10Mbps. [21]
- EtherNet/IP, Velocidad 100 – 1500Mbps. [19]
- PROFINET, Velocidad 100Mbps. [22]

- CC-Link, Velocidad 10Mbps. [23]
- Modbus TCP, Velocidad 100Mbps. [24]

### 5.2.2.3. Candidato a solución del tercer subproblema

Para el siguiente candidato del tercer subproblema se deben considerar las soluciones posibles para la inspección como tal. Para esto hay diferentes sistemas de visión que pueden tomarse como candidatos, pero Kopar como distribuidor es especialista en una marca específica de sistemas de visión llamada Cognex, por esta razón se va a indagar sobre los diferentes modelos y métodos que brindan una posible solución al subproblema de inspección.

Dentro del catálogo de Cognex los sistemas de visión se pueden separar en tres diferentes ramas, las cuales se van a mencionar a continuación:

- 1. Sensor de visión:** Los sensores de visión In-Sight 2000 de Cognex combinan el poder de los sistemas de visión In-Sight con la sencillez y lo accesible de un sensor industrial. Ideales para resolver aplicaciones de detección de errores, estos sensores de visión proporcionan nuevos estándares de valor, facilidad de uso y flexibilidad y pueden adaptarse a prácticamente cualquier ambiente de línea de producción [4]. En la Figura 5.3 se muestra la imagen del sensor de visión IS2000. Este sensor cuenta con una resolución desde 680 x 480 Píxeles hasta los 1280 x 960 píxeles, también puede capturar imágenes a color o monocromáticas y según su modelo pueden variar las herramientas disponibles para utilizar. Cuenta con diferentes colores de luz integrada como rojo, blanco, azul e infrarrojo. También es importante mencionar que cuenta con 2 entradas entre las cuales está la activación para la captura de imagen y 4 salidas digitales. Las herramientas con las que cuenta este modelo se pueden observar en la Figura A.2 en el Apéndice B.



Figura 5.3 Sensor de visión IS2000. [25]

Entre estos sensores de visión existe una rama adicional que cuenta con “*Deep learning*” que es una clase de inteligencia artificial basada en la forma de aprender del ser humano. Donde el sensor como tal aprender a base de fotos que el usuario de agrega al sistema identificándolas y así el mismo se crea su propia programación. Este modelo en especial para el sensor de visión es el IS2800 el cual se puede observar en la Figura 5.4. Las especificaciones de esta cámara se encuentran en la Figura A.3 en el Apéndice B.



Figura 5.4 Sensor de Visión IS2800 [26]

**2. Sistema de visión:** Los sistemas de visión artificial Cognex In-Sight 2D son incomparables en lo que respecta a su capacidad de inspeccionar, identificar y guiar piezas. Estos sistemas de visión autónomos y de calidad industrial combinan una biblioteca de herramientas de visión avanzadas con adquisición y procesamiento de imágenes a alta velocidad [27]. En sistemas de visión Cognex cuenta con cuatro diferentes modelos los cuales se especifican a continuación:

- **IS7000:** La serie In-Sight 7000 es un sistema de sistema de visión poderoso y completo que realiza inspecciones rápidas y precisas de una amplia variedad de piezas a lo largo de todas las industrias [28]. Cuenta con un diseño modular lo cual hace que sea personalizable a las diferentes necesidades que se puedan tener. Esta familia cuenta con modelos monocromáticos y a color los cuales cuentan con resolución desde VGA o 0.3MP (640 x 800 pixeles) has los 2MP (1600 x 1200 pixeles). En la Figura 5.5 se muestra la serie IS7000 con sus diferentes montajes de lente e iluminación.



*Figura 5.5 Sistema de visión IS7000. [28]*

- **IS8000:** Al igual que el modelo IS7000, la familia IS8000 cuenta con herramientas de inspección robustas, la diferencia entre estas 2 familias es el tamaño físico donde este modelo es ultracompacto, como se muestra en la Figura 5.6, para facilitar su incorporación en procesos donde no se cuente con mucho espacio disponible para colocar el sistema de visión. Además, otra diferencia es que la serie In-Sight 8000 cuenta con velocidades de comunicación más rápidas. Se cuenta con modelos tanto monocromáticos como a color. El rango de resolución es desde los 0.3MP a los 5MP.



*Figura 5.6 Sistema de Visión IS8000. [29]*

- **IS9000:** El In-Sight 9000 es una línea de sistemas de visión robustos y autónomos de resolución ultra alta. Con su capacidad para adquirir y procesar imágenes detalladas de forma excepcional, el In-Sight 9000 ofrece localización, medición e inspección de piezas de alta precisión en un área amplia, incluso si están montadas a distancias más largas [30].

Disponible en modelos monocromáticos y a color. Es capaz de adquirir imágenes detalladas en resolución de 12MP, esto lo hace ideal para realizar inspecciones y mediciones sin tener que sacrificar campo de visión. En la Figura 5.7 se puede observar la IS9000, es importante

mencionar que a este modelo se le puede adaptar las diferentes luces como las que se muestran en el modelo IS7000.



Figura 5.7 Sistema de visión IS9000. [30]

- **IS D900:** El In-Sight D900 es una cámara inteligente impulsada por el software In-Sight ViDi diseñado específicamente para ejecutar aplicaciones de *Deep Learning* [31]. De igual manera que las familias anteriormente mencionadas, cuenta con herramientas robustas de inspección, pero no son la especialidad de este sistema de visión. Como se menciona está diseñada para aplicaciones de *Deep learning* o inteligencia artificial, la cual cuenta con cuatro herramientas principales: In-Sight ViDi Read para realizar aplicaciones de lectura de caracteres, In-Sight ViDi Check para aplicaciones de revisión de componentes de presencia ausencia, In-Sight ViDi Detect para realizar aplicaciones de detección de defectos en piezas y por ultimo In-Sight ViDi Classify la cual es una herramienta de clasificación.

De igual manera este modelo está disponible en su versión monocromática y a color. Con resoluciones de las 2.3MP y 5MP. Se puede observar el modelo en la Figura 5.8.



*Figura 5.8 Sistema de visión IS D900. [31]*

En el Apéndice B en la figura A.5 y A.6 se observa un cuadro comparativo sobre las especificaciones de cada uno de los modelos mencionados anteriormente en el apartado de sensores y sistemas de visión.

- 3. Escáner 3D:** finalmente, Cognex cuenta con una línea de escáneres de visión 3D, donde crea un modelo en 3 dimensiones del objeto a escanear el cual puede realizar inspecciones y mediciones sobre el modelo generado. Este sistema de visión combina la tecnología de desplazamiento de láser 3D con una cámara inteligente, lo que permite resolver, de forma rápida y precisa, una amplia variedad de inspecciones [32]. El escáner se puede observar en la Figura 5.9.



Figura 5.9 Escáner 3D IS-L4000. [32]

#### 5.2.2.4. Candidato a solución del cuarto subproblema

Por último, se consideran las posibles soluciones del sistema responsable de la movilización del sistema de visión que inspecciona la pieza o del movimiento de la pieza como tal. El propósito es que sea capaz de realizar un movimiento controlado cada vez que se le dé la indicación para poder realizar la inspección completa del producto.

En este caso podemos dividir esta solución por fuente de activación, ya que se tiene como opción la neumática y la electricidad. No se considera la hidráulica ni la oleohidráulica debido a que se considera que no es una fuente “limpia” de carácter que puede llegar a afectar los productos si hay un derrame del fluido y es importante recordar que estos dispositivos son de carácter medico por lo que se desea no utilizar fuentes que puedan causarnos una contaminación grave del producto.

- 1. Fuente Neumática:** Actuadores con fuente de movimiento neumática se tienen diferentes tipos, en esta sección se proponen las soluciones con esta característica.

- **Pistones:** Esta opción se proponen pistones lineales como solución, por su movimiento lineal de los cuales cuentan con 2 o más posiciones. En este caso debe de ser un pistón no rotativo debido a que dependiendo del montaje puede rotar y causar inspecciones erróneas. En la Figura 5.10 se puede observar ejemplos de diferentes pistones como actuador lineal. Cabe destacar que este tipo de dispositivos no cuentan con precisiones, el funcionamiento es reducido a su activación solo por aire a cierta presión que dependiendo de su valor puede controlar la velocidad, pero no así la distancia de movimiento.



*Figura 5.10 Pistones. [33]*

- **Deslizaderas:** Al igual que los pistones las deslizaderas son de activación neumática, de movimiento lineal y puede contar con 2 o más posiciones. Este equipo, como el que se muestra en la Figura 5.11, cuenta con la ventaja de que no puede girarse sobre su eje a la hora de realizar el desplazamiento. De igual manera que la opción anterior, las deslizaderas neumáticas no cuentan con ninguna precisión debido a que su recorrido no es controlado, solo cuentan con un inicio y un final de su carrera o movimiento.



*Figura 5.11 Deslizadera neumática. [34]*

**2. Fuente eléctrica:** Actuadores de eléctricos tienen diferentes ventajas sobre los neumáticos, una de ellas y de las más importantes es que dependiendo del actuador su movimiento puede ser controlable en sentido de la distancia recorrida.

- **Deslizadera eléctrica:** Este tipo de deslizadera es de movimiento lineal y se utiliza para aplicaciones donde se requiera detener, empujar o jalar el elemento fijado en su base. Cuentan con buena precisión dependiendo del modelo que se utiliza. En la Figura 5.12 se muestra una deslizadera eléctrica, se puede apreciar que es muy parecida a la neumática a diferencia que en uno de sus extremos cuenta con un motor eléctrico que acciona el actuador.



*Figura 5.12 Deslizadera eléctrica. [35]*

- **Robot Lineal:** Esta opción es una mezcla de 2 deslizaderas eléctricas, esto hace que el movimiento que se pueda realizar por parte de la base desplazable sea en los ejes X y Y, realizando movimientos en un plano horizontal o vertical. Otro punto importante es que este robot cuenta con una buena precisión. En la Figura 5.13 se muestra un ejemplo de un robot lineal.



*Figura 5.13 Robot Lineal [36]*

Tabla 5.1 Especificaciones del robot lineal Intelliaxis H-Bot.

Especificaciones	Valores
Tamaño del perfil	80mm x 80mm
Avance	200 mm/rev
Velocidad máxima	5 m/s
Carrera en Y	Hasta 3500mm
Carrera en X	Hasta 4500mm
Dimensiones de la base transportadora	190mm
Precisión	±0.002mm

Fuente: [36]

- **Brazo Robótico:** El brazo robótico es una herramienta compuesto por varios servomotores, donde cada uno controla una articulación del dispositivo. El movimiento de este componente es por los 3 ejes, X, Y y Z, esto hace que pueda moverse en diferentes planos al mismo tiempo. Además, se cuenta con diferentes tipos que pueden ser de 4 ejes o de 6 ejes, el modelo a escoger depende de la aplicación que se desea realizar con el mismo. También cuentan con buenas precisiones y repetividad a la hora de realizar sus movimientos. Un ejemplo de brazo robótico se puede observar en la Figura 5.14, específicamente un robot de la marca Universal Robots.



*Figura 5.14 Brazo Robótico. [37]*

### 5.3. Construcción de conceptos

Al finalizar la etapa anterior de la búsqueda interna y externa, se han recogido diferentes conceptos o soluciones a los subproblemas planteados de los cuales se puede avanzar a la siguiente etapa donde se da una selección de conceptos que guía a una solución final.

Para poder llegar a este punto donde contamos con una solución al problema general primero se debe organizar de la mejor manera los conceptos realizando una clasificación según su funcionalidad y facilidad de acceso. De esta manera se debe organizar una combinación de conceptos según el subproblema relacionado.

Según [15] se pueden utilizar dos herramientas que facilitan el trabajo de realizar las combinaciones, estos son:

- **Árbol de generación de conceptos:** Se emplea para dividir todo el espacio en posibles soluciones en varias clases que facilitan la comparación y eliminación de conceptos. La idea de eliminar ramas es identificar las soluciones que no valen la pena explorar porque no tienen sentido en la solución o son de difícil acceso. Generalmente

este método se considera como un filtro para el siguiente procedimiento.

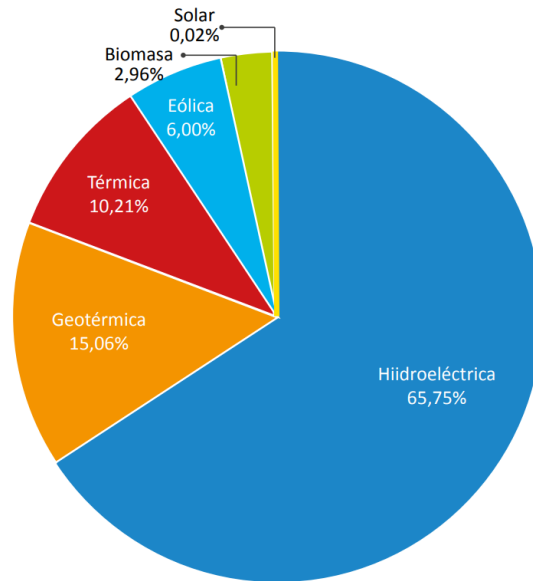
- **Tabla de combinación de conceptos:** Se utiliza como una forma sistemática de combinar los conceptos generados de la sección 5.2, con esto se logra tener una solución conjunta de los diferentes subproblemas para una solución general.

### 5.3.1. Árbol de generación de conceptos

Como se mencionó en el punto anterior, este método funciona como un filtro para la siguiente etapa donde se hace una combinación de conceptos. A continuación, se presentan los árboles para cada uno de los subproblemas planeados.

#### 5.3.1.1. Recepción de la energía eléctrica

Tomando en cuenta el subproblema de la alimentación de la energía eléctrica para los equipos que se utilizan en el proyecto se realizó el árbol de conceptos, donde se puede observar las diferentes formas de alimentación de energía eléctrica. Según la investigación realizada se revisaron muchos tipos de obtención de energía eléctrica, pero solo se toman en cuenta las más comunes y de fácil acceso en el país. Según [38] en Costa Rica se da un 99.98% de generación de energía renovable, en la Figura 5.15 se observa la distribución de la obtención de energía según los métodos, de estos tipos se agregan en el árbol de conceptos y se toman como referencia para la solución del subproblema planteado.



*Figura 5.15 Estructura de matriz de generación eléctrica. [38]*

De esta manera se concluye que todas las formas de energía propuestas son parte de la solución dentro de la energía eléctrica al conectarse a la red eléctrica principal. Por esta razón se plantea como solución final a este subproblema la conexión a la red eléctrica para alimentar los equipos utilizados en el proyecto. En la Figura 5.16 se muestra el árbol de conceptos generado para esta solución.

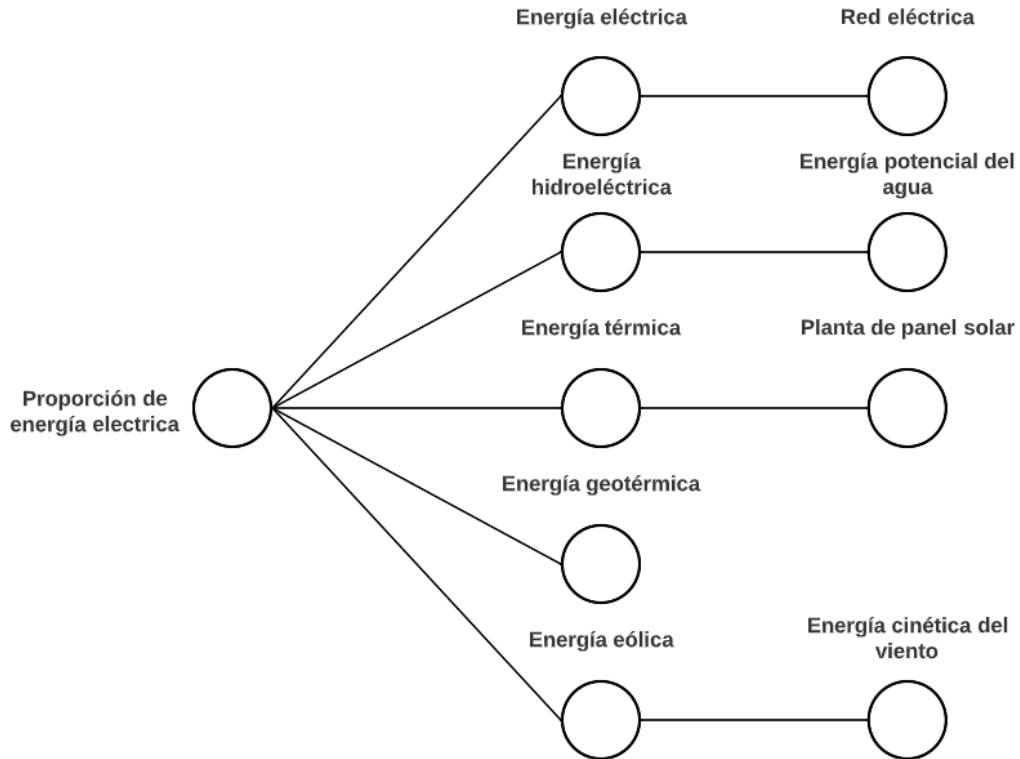


Figura 5.16 Árbol de conceptos de recepción de energía eléctrica. Elaboración propia

### 5.3.1.2. Activación de procesos y actuadores

En este apartado se muestran los conceptos generados para el subproblema de activación de procesos y actuadores. El árbol de conceptos para este subproblema se puede observar en la Figura 5.17 donde se muestran las opciones tomadas en cuenta para su solución. Es importante mencionar que normalmente estos sistemas en el laboratorio utilizan señales digitales para enviar las señales, pero se deben explorar las otras opciones debido a que pueden ser mejores alternativas según la función o activación que se deba realizar, esto también depende de las entradas y salidas con las que cuentan los dispositivos que se van a elegir a la hora de realizar la inspección.

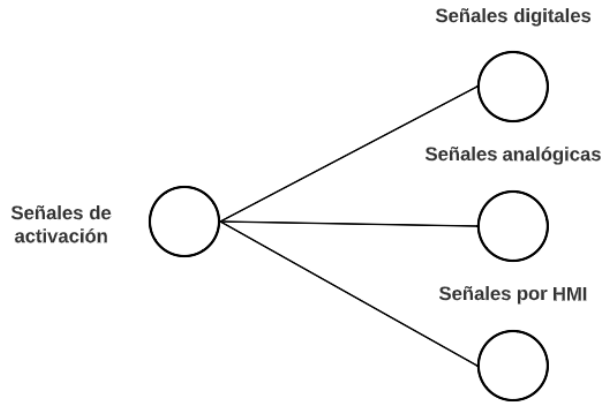


Figura 5.17 Árbol de conceptos de señales de activación de procesos y actuadores. Fuente propia

### 5.3.1.3. Identificación de señales o instrucciones

En la Figura 5.18 se observa el árbol de conceptos generado para la solución del subproblema de la identificación de señales o instrucciones. Las soluciones planteadas son métodos muy comunes de uso en la industria, esto depende de la facilidad de cada ingeniero de programación o también del método de programación que tienen los equipos utilizados. El método de lenguajes gráficos es de mayor facilidad de entendimiento, pero normalmente el lenguaje de texto cuenta con la ventaja de que tiene mayor alcance a la hora de utilización de herramientas.

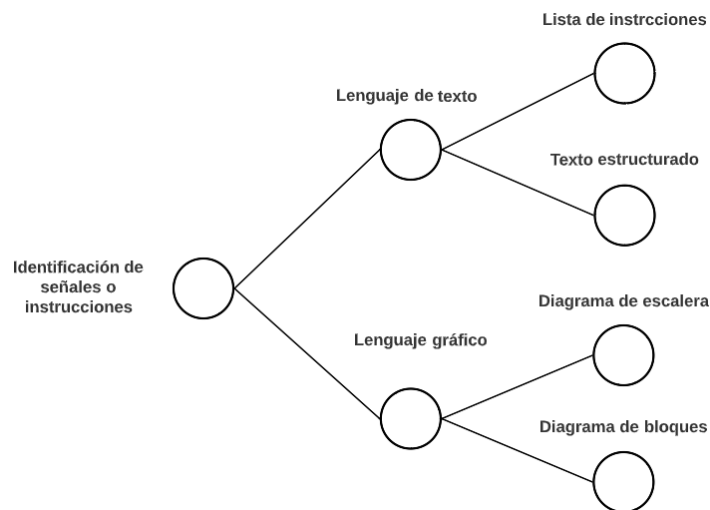


Figura 5.18 Árbol de conceptos de identificación de señales o instrucciones. Elaboración propia

Para realizar una preselección de las soluciones que van a avanzar a la siguiente etapa y que pueden ser candidatos a la solución completa, se realiza la Tabla 5.2 donde se hace una comparación de los tipos de lenguaje para la identificación de señales o instrucciones. En dicha tabla se exponen diferentes métricas y la calificación de cada uno de candidatos con la que cumple dicha métrica. La calificación es asignada con un valor del 1 al 5 donde el número uno es el valor más bajo y el cinco el valor más alto. Al fin se suman las calificaciones obtenidas en cada una de más métricas para así seleccionar las opciones con mayor puntaje.

Tabla 5.2 Tabla comparativa de lenguajes.

Métrica	Lista de instrucciones	Texto estructurado	Diagrama de escalera	Diagrama de bloques
Facilidad de entendimiento	1	4	3	5
Facilidad de programación	1	4	3	4
Frecuencia de uso en la industria	1	5	4	4
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>13</b>

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la tabla anterior se procede a eliminar las opciones con menor puntaje en la calificación, por lo que “Lista de instrucciones” que es la opción con el menor puntaje se elimina y “Diagrama de escalera” que, aunque tuvo un puntaje

alto se considera como una opción que se puede eliminar debido a que si está por debajo de las mejores opciones.

Por lo cual esto deja solo dos posibles soluciones dentro de esta categoría de conceptos a elegir para el siguiente paso.

5.3.1.4. Almacenamiento de datos

Para la elaboración del árbol de conceptos del almacenamiento de datos lo que se toma en cuenta es el tipo de comunicación por el cual pueda enviarse los datos que se desean almacenar en la computadora o servidor. En la Figura 5.19 se observa la creación de dicho árbol y las posibles soluciones a este subproblema.

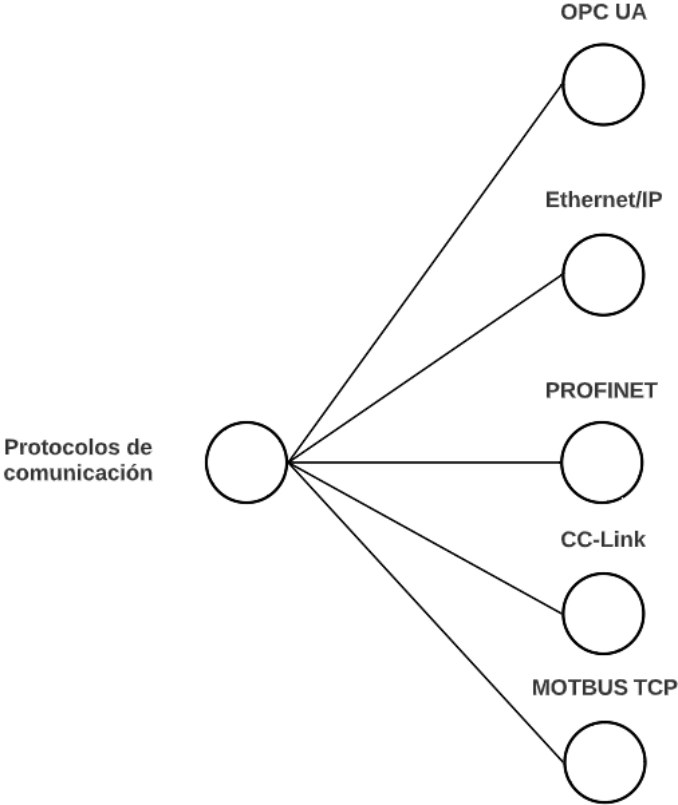


Figura 5.19 Árbol de conceptos de protocolos de comunicación. Elaboración propia

Del árbol mostrado en la figura 5.19 se genera una tabla comparativa para calificar cada una de las opciones de solución y así realizar una eliminación de

ramas de las que pueden aportar menos a la solución completa y no vale la pena indagar en ellas. En la Tabla 5.3 se observa la comparación realizada.

Tabla 5.3 Tabla comparativa de protocolos de comunicación.

Métrica	OPC UA	Ethernet/IP	PROFINET	CC-Link	MODBUS TCP
Facilidad de uso	2	4	4	3	4
Disponibilidad en dispositivos	2	5	5	4	5
Velocidad de envío de datos	3	5	5	3	5
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>14</b>

Fuente: Elaboración propia

En el árbol de conceptos sobre el almacenamiento de datos se procede a eliminar las ramas de “OPC UA” y “CC-Link” debido a que en comparación a las otras opciones no son de uso frecuente en la industria y además su velocidad es más baja comparado con los otros protocolos de comunicación.

#### 5.3.1.5. Sistema de visión

En el siguiente apartado se genera el árbol de conceptos sobre el sistema de visión. Como se ha mencionado anteriormente este debe ser capaz de inspeccionar piezas de dimensiones pequeñas en relación del diámetro (menor a 1mm) además de su longitud que puede ser variable, dentro de la inspección también se debe inspeccionar secciones donde las vueltas del embobinado deben cumplir con cierto espaciado entre ellas. Dentro de todo lo antes mencionado dentro del sistema de visión se debe considerar las herramientas disponibles para la inspección, la resolución del equipo la cual es importante cuando se habla de precisiones pequeñas, iluminación ya sea

externa o interna de la cámara, lentes a utilizar y cualquier accesorio que sea de utilidad para llevar a cabo una inspección satisfactoria. Dentro de este árbol que se observa en la Figura 5.20 se exponen todas las opciones de la marca Cognex detalladas en la sección 5.2.2.3.

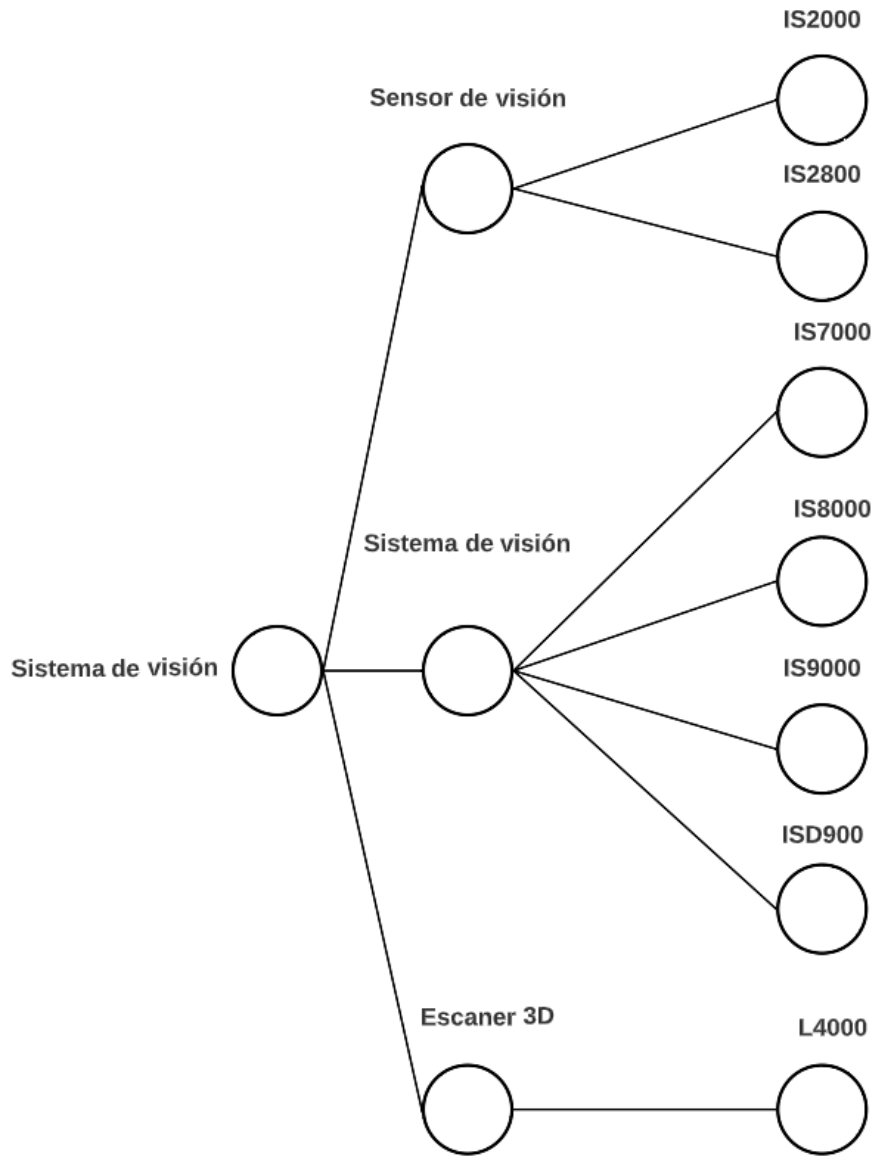


Figura 5.20 Árbol de conceptos de sistemas de visión. Elaboración propia

Seguidamente se procede a generar una tabla comparativa sobre cada uno de los sistemas de visión propuestos para realizar una eliminación de ramas y así facilitar la selección de los modelos que son una solución más favorable

para el subproblema de la inspección de los productos. Los datos utilizados para rellenar la Tabla 5.4 son tomados de las figuras A.4, A.5 y A.6.

Tabla 5.4 Tabla comparativa de sistemas de visión.

Métrica	IS2000	IS2800	IS7000	IS8000	IS9000	ISD900	ISL400
Resolución	2	3	4	4	5	4	4
Velocidad de adquisición	3	2	5	5	1	2	4
Herramientas	2	2	5	5	5	5	4
Protocolos de comunicación	4	3	5	5	5	3	4
Entradas/Salidas	5	5	5	3	4	5	3
Precio	5	5	4	3	3	2	2
Disponibilidad	5	5	5	3	3	5	5
Facilidad de uso	5	5	4	4	4	3	2
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>37</b>	<b>32</b>	<b>30</b>	<b>29</b>	<b>28</b>

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a este concepto se toma la decisión de utilizar los 3 candidatos con mayor puntaje en la tabla comparativa debido a que son los conceptos con mejores cualidades que pueden satisfacer las necesidades del subproblema de la inspección de las piezas. Por lo que se elimina la rama de los sensores de visión y la del escáner 3D.

Es importante también tomar en cuenta que para la aplicación de inspección a realizar no es necesario ninguna de las herramientas de inteligencia artificial con las que cuentan los modelos IS2800 e ISD900, por esta razón también es un factor importante de la eliminación de dichas familias para la siguiente etapa, ya que el valor agregado que tienen sobre los sistemas de visión con herramientas tradicionales no tiene ningún uso provechoso.

### 5.3.1.6. Sistema de Movilización

Por último, se crea el árbol de conceptos mostrado en la Figura 5.21 sobre el sistema de movilización, este sistema es el encargado de mover el sistema de visión para poder realizar la inspección que se deben realizar tanto a lo largo de la pieza como toda su longitud, también es importante tomar en cuenta que el sistema debe ser controlable y con una buena precisión porque debe ser capaz de detenerse en el lugar que se le indique para realizar las inspecciones.

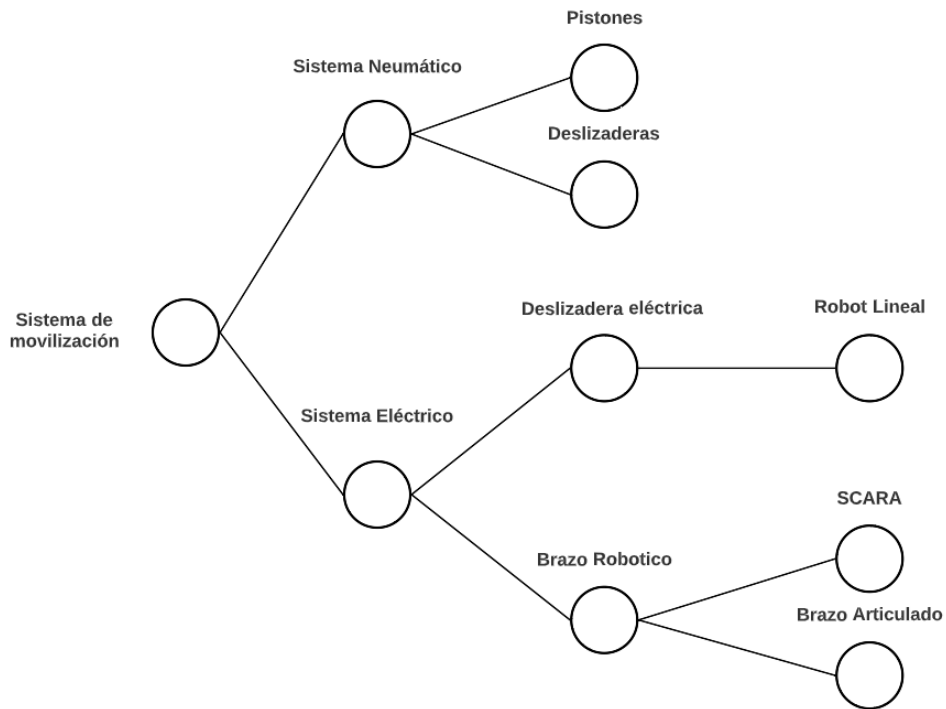


Figura 5.21 Árbol de conceptos del sistema de movilización. Elaboración propia

A continuación, se crea una tabla comparativa sobre las opciones de solución del sistema de movilización para avanzar a la siguiente etapa con los conceptos que si se acoplan a la necesidad y requerimiento propuesta por el cliente. En la Tabla 5.5 se observa esta comparación mencionada. La información utilizada para generar la siguiente tabla se toma de las especificaciones de los productos descritas en la Tabla 5.1 y las Figuras A.8 y A.9 de la sección de apéndices.

Tabla 5.5 Tabla comparativa de sistema de movilización.

Métricas	Neumática		Eléctrica		
	Pistón	Deslizadera	Robot Lineal	SCARA	Robot Articulado
Precisión	1	1	5	5	5
Disponibilidad	3	3	1	5	3
Precio	5	5	2	4	2
Carga útil	3	3	5	5	5
Facilidad de obtener fuente para activación	3	3	5	5	5
Control de movimiento	2	2	5	5	5
Facilidad de control	5	5	2	4	4
Alcance	2	2	4	4	4
Grados de libertad	1	1	2	4	5
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>31</b>	<b>41</b>	<b>38</b>

Fuente: Elaboración propia

En conversaciones con la ingeniera y el asesor se compararon todas las opciones propuestas en la sección 5.2.2.4 y se comentaron un poco sobre ellas. Los sistemas neumáticos tienen la ventaja que su activación es muy sencilla pero no cuentan con un control de posición como tal que se pueda detener en cualquier momento de su recorrido. Los sistemas eléctricos vienen siendo una mejor solución debido a su control los cuales son capaces de detenerse donde se desea, la dificultad es que deben tener un proceso de programación para su control. Para estas opciones se debe analizar cual opción cuenta con más ventajas sobre los otros y tiene mejor rendimiento. En la figura 5.21 se puede observar el resultado del árbol de conceptos del sistema de movilización.

### 5.3.2. Tablas de combinaciones

Al contar finalmente con todos los arboles de conceptos terminados y analizados se procede a realizar las tablas de combinaciones entre todos los árboles generados en la sección anterior. Para el método de recepción de energía se considera 1 opción, por esta razón no se representa en las tablas de combinaciones, para la activación de procesos y actuadores se consideran 3 opciones, 2 para la identificación de señales o instrucciones, 3 para el almacenamiento de datos, 4 para el sistema de visión y finalmente 3 para el sistema de movilización. Con la cantidad de soluciones a los subproblemas se pueden obtener hasta 162 conceptos generados, estas combinaciones se pueden observar en la Figura 5.22.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.22 Tabla de combinaciones de los conceptos para cada subproblema. Elaboración propia

Teniendo en cuenta cada una de las soluciones planteadas y sus combinaciones posibles, se exploran cada una de ellas, pero solo se documentan las 19 más destacadas y que son las que tienen más posibilidad de funcionar.

- **Concepto A:** Este concepto utiliza señales digitales para activar los procesos y los dispositivos como el sistema de visión y el de movilización con los que cuenta la estación de inspección. Utiliza el texto estructurado como la interpretación de instrucciones para facilitar la programación de los dispositivos junto con la comunicación por Ethernet IP para enviar los archivos que se desean almacenar. Posteriormente está utilizando un sistema de visión de la familia IS7000 adecuada para realizar las inspecciones y mediciones que se necesiten en el producto. Finalmente, el sistema de movilización a utilizar es el robot lineal, conjunto de deslizaderas eléctricas para moverse en los ejes. En la Figura 5.23 se puede observar la tabla de combinación del concepto A.

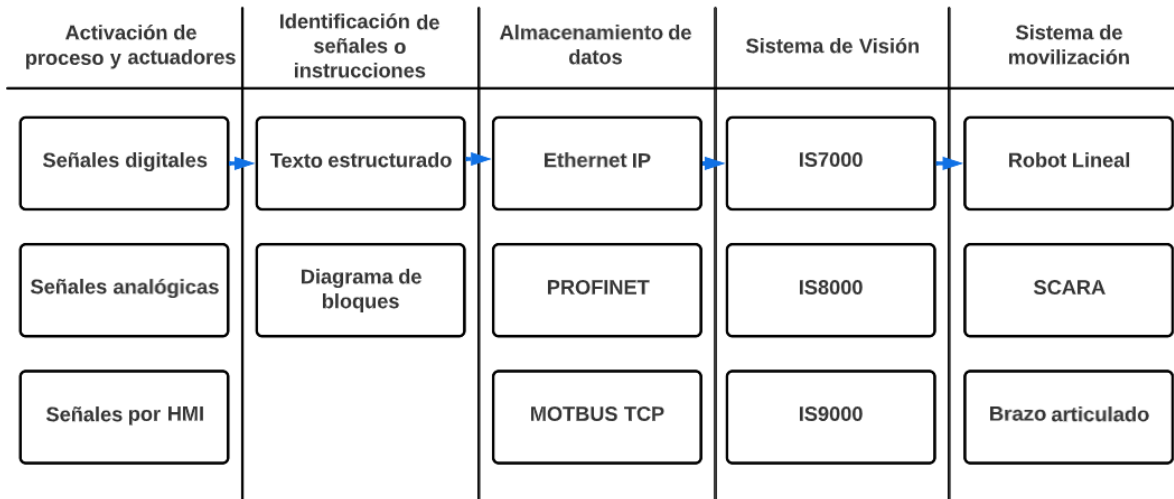


Figura 5.23 Tabla de combinación del concepto A. Elaboración propia

- **Concepto B:** Este concepto al igual que el anterior utiliza las señales digitales para la activación del proceso y de los dispositivos que se utilizan. Además, usa el texto estructurado como programación de los dispositivos y la comunicación por Ethernet IP para el almacenamiento de señales. El sistema de visión para la inspección es la familia IS7000 la junto con el sistema de movilización por medio de un robot SCARA el cual facilita el control del movimiento y añade 2 ejes más por si se necesita realizar ajustes en otros planos. Este concepto está representado en la Figura 5.24 con su respectiva tabla de combinación.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.24 Tabla de combinación del concepto B. Elaboración propia

- **Concepto C:** En a Figura 5.25 se observa un concepto muy parecido al anterior solo se diferencia en el tipo de actuador que utiliza, se toma en cuenta el uso de un brazo robótico articulado o de 6 ejes como se conoce, esto agrega 2 ejes más de movimiento al concepto anterior.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.25 Tabla de combinación del concepto C. Elaboración propia

- **Concepto D:** En este concepto varía en la implementación del protocolo de comunicación Modbus TCP y se utiliza nuevamente un robot lineal de

2 ejes de libertad. Se puede observar en la Figura 5.26 la tabla de combinación referente al concepto D.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.26 Tabla de combinación del concepto D. Elaboración propia

- **Concepto E:** En la Figura 5.27 se observa la tabla de combinación de este concepto, el cual es muy similar al anterior, pero con la diferencia del sistema de movilización regresa a ser un robot SCARA con 4 ejes de libertad.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.27 Tabla de combinación del concepto E. Elaboración propia

- **Concepto F:** Al igual que el concepto anterior, este concepto utiliza las señales digitales, el texto estructurado como forma de programación, el protocolo de comunicación Modbus TCP, el sistema de visión IS7000 y finalmente como sistema de movilización utiliza un brazo articulado de 6 ejes. La tabla de combinación de este concepto se puede observar en la Figura 5.28

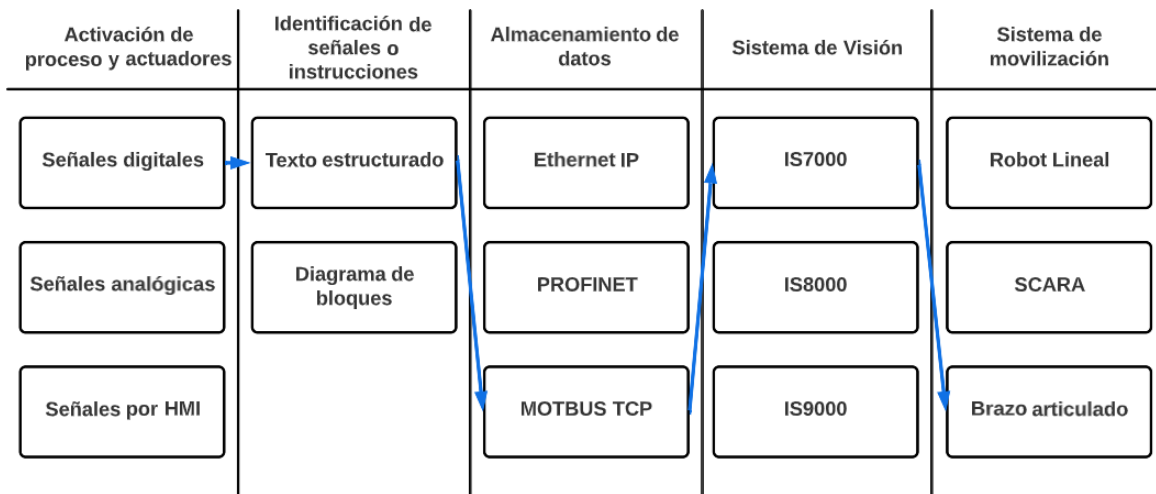


Figura 5.28 Tabla de combinación del concepto F. Elaboración propia

- **Concepto G:** En la Figura 5.29 se observa la tala de combinación de este concepto, donde se realiza un cambio en el sistema de visión utilizado el modelo a tomar en cuenta es el IS8000, de menor tamaño y mayor rapidez del considerado en el concepto anterior. De igual manera también se cambia el protocolo de comunicación a Ethernet IP y finalmente, el sistema de movilización vuelve a ser el robot lineal de 2 grados de libertad.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.29 Tabla de combinación del concepto G. Elaboración propia

- **Concepto H:** Igual que el concepto anterior, pero con el sistema de movilización con robot SCARA de 4 ejes de libertad, para realizar movimientos en diferentes planos que el concepto anterior. Ver Figura 5.30 como representación de la tabla de combinación.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.30 Tabla de combinación del concepto H. Elaboración propia

- **Concepto I:** Este concepto contempla las mismas soluciones que el anterior, la diferencia es el sistema de movilización donde en este caso

se toma en cuenta un brazo robótico articulado con 6 ejes de libertad. Se puede observar en la Figura 5.31 la representación de este concepto.

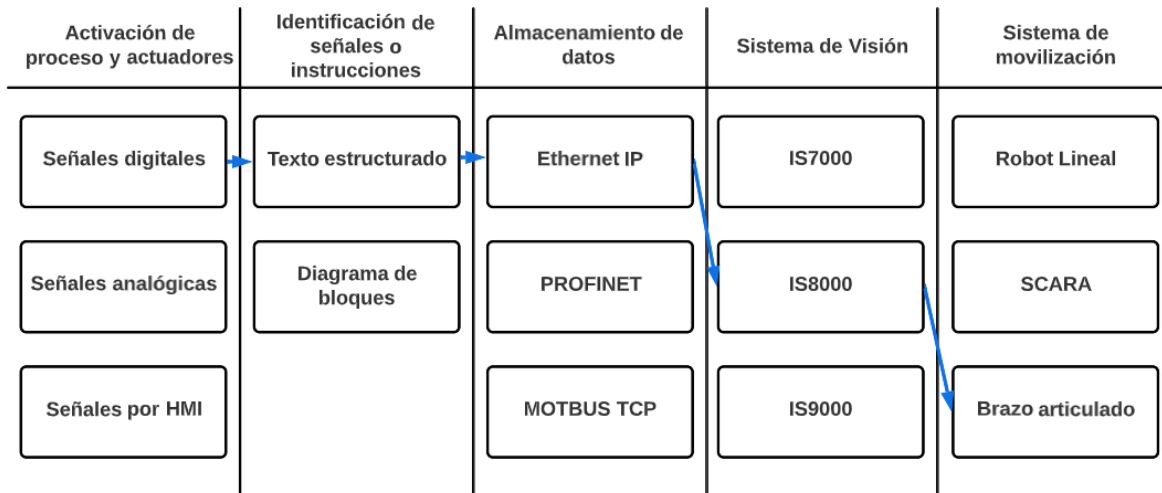


Figura 5.31 Tabla de combinación del concepto I. Elaboración propia

- **Concepto J:** Este concepto cuenta con diferentes cambios comparado al anterior, para la activación de los procesos y actuadores se utilizan las señales analógicas, en identificación de señales o instrucciones se toma en cuenta la programación por diagramas de bloques, el protocolo de comunicación utilizado para este concepto es PROFINET, el sistema de visión es el modelo IS9000 donde se cuenta con cámaras de alta resolución y finalmente, en el sistema de movilización se utiliza el robot lineal con capacidad de movimiento en 2 ejes. La representación de la tabla de combinación de este concepto se puede observar en la Figura 5.32.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.32 Tabla de combinación del concepto J. Elaboración propia

- **Concepto K:** Este concepto es igual al anterior, pero con la diferencia de que el sistema de movilización utilizado es un brazo robótico tipo SCARA con 4 grados de libertad de movimiento. En la Figura 5.33 se puede observar la representación de este concepto en forma de tabla de combinación.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.33 Tabla de combinación del concepto K. Elaboración propia

- **Concepto L:** En la Figura 5.34 se muestra la representación de este concepto en forma de tabla de combinación que cuenta como sistema de movilización con un brazo robótico articulado de 6 ejes de movimiento, además de ese cambio este concepto es igual al anterior.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.34 Tabla de combinación del concepto L. Elaboración propia

- **Concepto M:** El siguiente concepto tiene como activación de proceso y actuadores las señales por HMI, la programación para identificación de señales o instrucciones es por diagrama de bloques, el protocolo de comunicación para el envío de datos y su almacenamiento es por MOTBUS TCP, el sistema de visión a utilizar es el IS8000 y por último el sistema de movilización es el robot lineal de 2 ejes de libertad. La representación de este concepto se puede observar en la Figura 5.35.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.35 Tabla de combinación del concepto M. Elaboración propia

- **Concepto N:** Este concepto es igual al anterior, pero con el sistema de movilización con el brazo robótico SCARA. En la Figura 5.36 se puede observar la tabla de combinación propia de este concepto.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.36 Tabla de combinación del concepto N. Elaboración propia

- **Concepto O:** El siguiente concepto toma como activación de proceso y actuadores las señales digitales las señales por HMI, el tipo de programación para la identificación de señales o instrucciones los diagramas de bloques, el almacenamiento de datos utiliza un protocolo

de comunicación por Modus TCP para enviar la información, el sistema de visión utilizado es el IS7000 y el sistema de movilización utiliza un brazo robótico SCARA de 4 grados de libertad. La representación de este concepto se puede observar en la Figura 5.37.

Activación de proceso y actuadores	Identificación de señales o instrucciones	Almacenamiento de datos	Sistema de Visión	Sistema de movilización
Señales digitales	Texto estructurado	Ethernet IP	IS7000	Robot Lineal
Señales analógicas	Diagrama de bloques	PROFINET	IS8000	SCARA
Señales por HMI		MOTBUS TCP	IS9000	Brazo articulado

Figura 5.37 Tabla de combinación del concepto O. Elaboración propia

- **Concepto P:** Este concepto es igual al anterior, con diferencia del tipo de comunicación para el envío y almacenamiento de información el cual en este caso es por PROFINET. En la Figura 5.38 se puede observar la representación de dicho concepto.

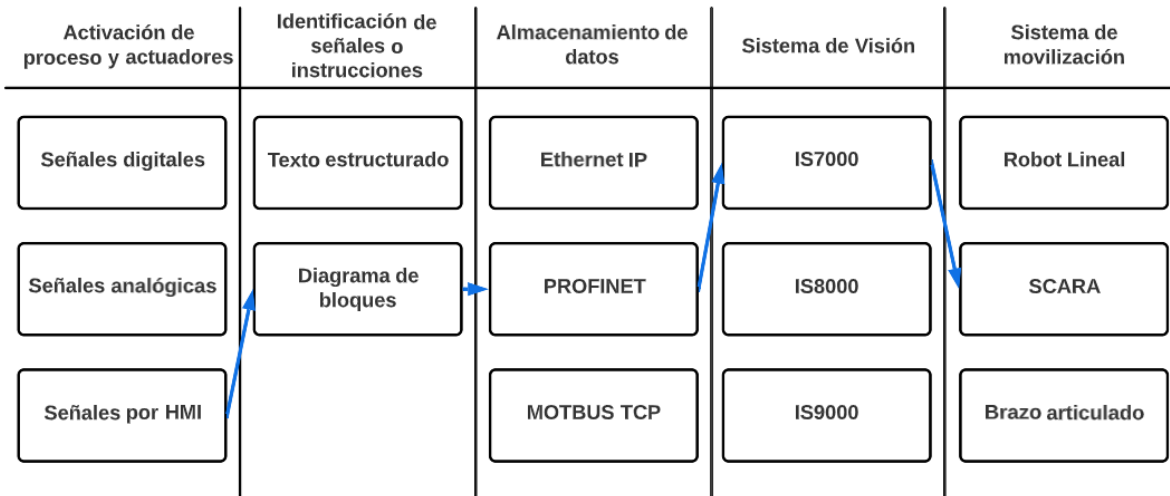


Figura 5.38 Tabla de combinación del concepto P. Elaboración propia

- **Concepto Q:** Este concepto es igual al anterior en su mayoría, con la diferencia que el sistema de activación del proceso en este caso es por señales analógicas. En la Figura 5.39 se observa la tabla de combinación de este concepto.

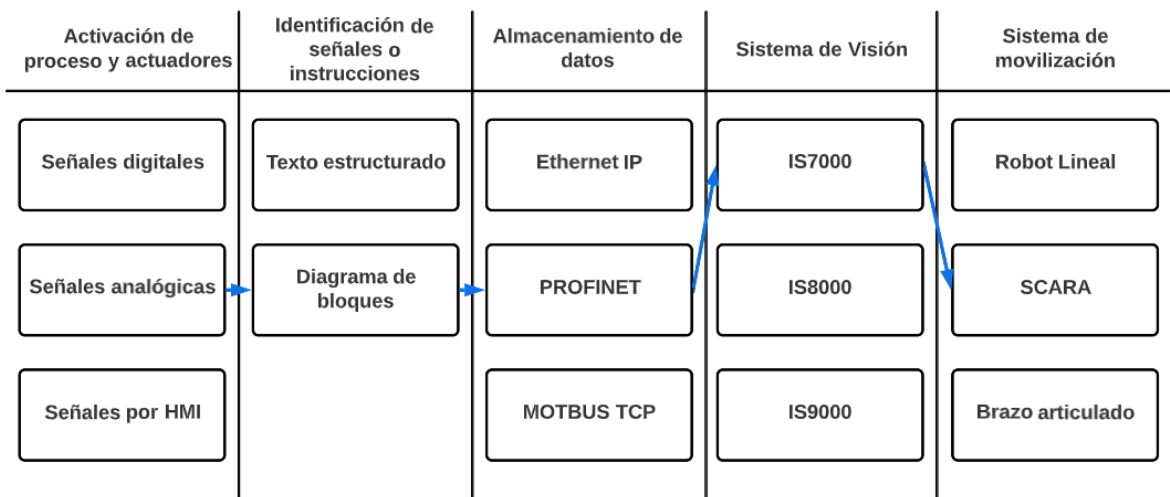


Figura 5.39 Tabla de combinación del concepto Q. Elaboración propia

- **Concepto R:** el siguiente concepto muestra las mismas soluciones que el concepto anterior, pero con diferencia en el sistema de movilización por

el cual en este caso se trata del brazo robótico articulado. En la Figura 5.40 se puede observar la representación de dicho concepto.

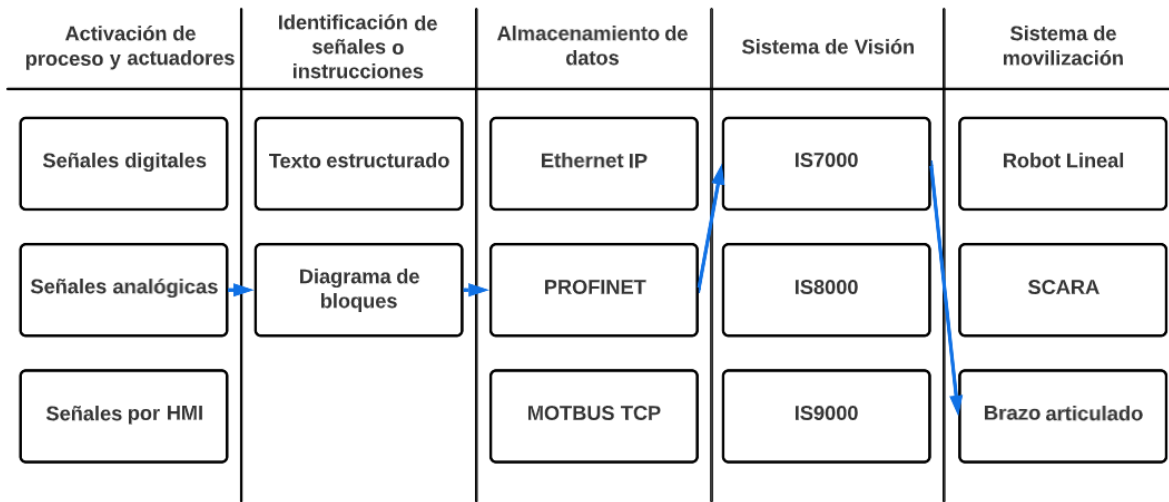


Figura 5.40 Tabla de combinación del concepto R. Elaboración propia

- **Concepto S:** Este concepto cuenta con señales digitales para la activación de proceso, diagrama de bloques como forma de programación para la identificación de señales o de instrucciones, el protocolo de comunicación a usar es el Ethernet IP para el envío y almacenamiento de datos, el sistema de visión a utilizar es la serie IS8000 y por último el sistema de movilización es un brazo robótico tipo SCARA con 4 ejes de libertad. En la Figura 5.41 se puede observar la representación de este concepto por medio de una tabla de combinación.

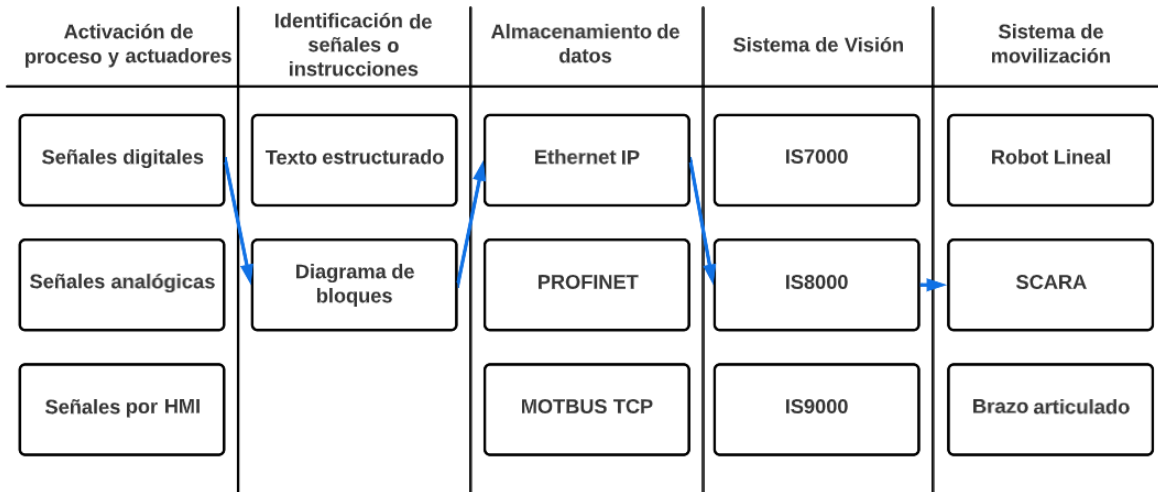


Figura 5.41 Tabla de combinación del concepto S. Elaboración propia

#### 5.4. Selección de conceptos

En la siguiente parte de etapa de la generación de conceptos se procede a realizar una evaluación sobre el cumplimiento de las especificaciones y necesidades planteadas anteriormente contra cada concepto generado. Es importante mencionar que en esta fase cuando se evalúan los conceptos hay unos que son más fuertes que otros en torno a la solución general que se desea obtener, por esta razón más adelante se genera un proceso de filtrado donde se busca obtener el concepto que cumpla con cada una de las necesidades por medio de una solución completa para así poder avanzar al proceso de diseño y validación de esta solución.

Para continuar con el proceso de selección se necesita pasar por dos etapas necesarias para obtener una solución al problema general. La primera etapa, como se mencionó anteriormente es realizar un filtrado de conceptos donde se descartan aquellos que no cumplen las necesidades del cliente, también se puede realizar combinaciones de conceptos que sean similares en esta etapa con el fin de generar un concepto más robusto y concreto. La segunda etapa, es donde se realiza una evaluación más detallada y precisa de los conceptos resultantes del filtrado. En este

punto es donde el concepto con mejor calificación en la evaluación es el concepto de diseño a utilizar, ya que es el que cumple con todas las necesidades del cliente de la mejor manera.

#### 5.4.1. Proceso de filtrado

Para iniciar el proceso de filtrado, primero se debe jerarquizar la lista de necesidades planteadas anteriormente en la sección 3 de este documento, esta lista con su respectiva jerarquización se puede observar en la tabla 5.6. Con respecto a esta lista se procede a generar una matriz de selección de conceptos donde se realiza el primer proceso de filtrado donde se consideran diferentes criterios de cada concepto que se ajusten a los relacionados con cada necesidad. Para poder realizar la evaluación de estos conceptos en la matriz de selección de conceptos se debe tomar en cuenta un concepto de referencia, en este caso es la estación actual de inspección, para poder así evaluar si cada concepto a evaluar es mejor o peor que la referencia y así generar el filtrado de dichos conceptos. El proceso que se sigue para el primer filtrado en la matriz es asignar un “-“, un “+” o un “0” a los conceptos según se comparan con la referencia, de esta manera se asigna un “-“ para el concepto que sea peor que la referencia, se asigna el “+” cuando el concepto sea mejor y un “0” cuando entre la referencia y el concepto a evaluar no tengan diferencia entre sí. Una vez realizada esta evaluación se procede a sumar los cada una de las calificaciones para que cada concepto tenga una calificación total y con respecto a ese valor evaluar dicho concepto. En este paso con respecto a su calificación se clasifican los conceptos, los de mayor puntaje reciben un “pasa”, esto quiere decir que puede continuar el concepto a la siguiente etapa de evaluación. Los de calificación intermedia obtienen un “combinar”, donde lo que se desea es combinar con otro concepto con mejor calificación o parecida para que en la siguiente etapa de evaluación obtenga un mejor resultado. Finalmente, si el concepto tiene una calificación muy baja comparado con los demás conceptos, obtiene un “eliminar”, lo que quiere decir que dicho concepto no se toma en cuenta

para la siguiente etapa de evaluación debido a que no cumplió con los suficientes requerimientos para contarse como una solución factible.

Para este caso el concepto utilizado como referencia es el procedimiento utilizado actualmente como método de inspección de los productos, este método se explica en el capítulo 4: Diagnostico, donde la técnica de inspección es por medio de un sistema manual en el cual se deben realizar diferentes ajustes mientras se inspecciona una pieza a la vez y cuenta con un tiempo de inspección promedio de 3 minutos.

Tabla 5.6 Criterios de selección

No.	Criterio de selección	Importancia	Peso
1	El sistema es capaz de realizar inspecciones según el plano de la pieza.	5	8.77
2	El sistema es capaz de inspeccionar piezas de diámetros menores a 1mm.	5	8.77
3	El sistema es tiene un rango de movimiento de al menos 160 mm	4	7.02
4	Permite corregir el enfoque de la cámara de forma automática en caso de que este no sea el correcto.	4	7.02
5	El sistema es capaz de realizar el movimiento de forma automática.	5	8.77
6	El voltaje de alimentación del sistema es de 24V, 110V o 240V	3	5.26
7	El sistema de movilización utiliza una fuente para su movimiento por aire comprimido o electricidad.	4	7.02

8	El sistema es capaz de inspeccionar el producto en menos de 2 minutos.	5	8.77
9	El sistema es de fácil uso y programación por el usuario.	4	7.02
10	La estación de inspección cuenta con una interfaz donde el usuario pueda interactuar con la máquina y puede visualizar las inspecciones.	3	5.26
11	El sistema tiene la capacidad de inspeccionar diferentes piezas por ciclo de inspección.	4	7.02
12	El sistema tiene capacidad de utilizar diferentes tipos de protocolos de comunicación	3	5.26
13	El sistema cuenta con la capacidad de almacenar los datos de las inspecciones.	4	7.02
14	Costo de los equipos menor a \$25 000	4	7.02
<b>Total</b>		<b>57</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

En la tabla A.1 en el anexo D se puede observar los resultados obtenidos de la primera etapa de filtrado donde se evaluaron los 19 conceptos diferentes y detallados en la sección anterior, de estos conceptos se eliminaron 10 de ellos los cuales no satisfacen de la mejor manera debido a sus características las necesidades planteadas. Por otra parte, 3 obtuvieron las mejores calificaciones y avanzan directamente a la siguiente etapa del filtrado. Los 6 conceptos restantes obtuvieron buenas calificaciones, pero no destacaron totalmente por si solos, por esta razón se consideran para combinarse entre los que son similares y así obtener

un concepto combinado que puede tener una mejor calificación que las que ya se evaluaron.

Antes de realizar las combinaciones de los conceptos restantes se evalúa si se puede combinar con los demás conceptos. Se concluye que el concepto “H” y “K” no se puede combinar con ningún otro debido a que los 2 cuentan con sistemas de visión diferente por lo que implicaría utilizar 2 sistemas de visión realizando la misma función, por lo que procede a continuar con dichos conceptos como soluciones por si solas.

Entre los conceptos “B”, “E”, “Q” y “R” si son similares en su mayoría ya que contemplan el mismo sistema de visión y sistema de movilización a excepción del último que utiliza un sistema diferente en su movilización, por lo que sucede el mismo caso anterior, en este caso el concepto “R” también avanza como solución por sí solo. A continuación, se muestra el concepto resultante de la combinación realizada:

- **Concepto B–E–Q:** Este concepto como se mencionó anteriormente es la combinación de los conceptos “B”, “E” y “Q”, el fin de esta combinación es crear un concepto nuevo adoptando las características de los 3 para así que sea más robusto o completo comparado con los conceptos planteados inicialmente. Las características de este concepto incluyen, para la activación de procesos y actuadores se toman tanto señales digitales como las analógicas por lo que puede utilizarse cualquier método como activación, el tipo de programación utilizada para la identificación de señales se toma el texto estructurado y los diagramas de bloques, lo cual puede facilitar el entendimiento y facilidad de la programación, Los protocolos de comunicación se toman las 3 opciones: Ethernet IP, PROFINET y Modbus TCP, esto ayuda que se utilice el que sea de preferencia por el usuario y su facilidad. Para el sistema de visión se conserva el modelo IS7000 y para el sistema de movilización se conserva el brazo robótico tipo SCARA. La representación de este concepto en tabla de combinación se presenta en la Figura 5.42.

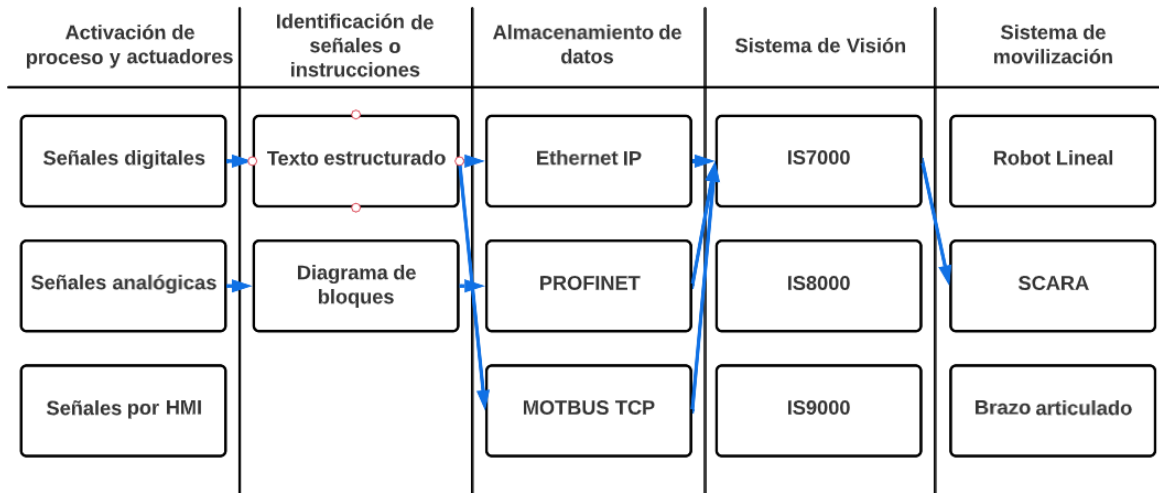


Figura 5.42 Tabla de combinación del concepto B-E-Q. Elaboración propia

Al realizar la combinación de estos conceptos se vuelven a evaluar en la misma tabla contra los conceptos que si avanzaron a la segunda etapa de filtrado, la tabla A.2 se puede observar la generación de esta tabla comparativa del segundo filtrado. En este caso se procede a eliminar 2 de los conceptos que habían avanzado a la segunda etapa de filtrado. Además de eso se propone realizar una última combinación para poder abarcar la mayoría de las necesidades en la creación de la solución por esta razón se genera el concepto “B”, “E”, “Q” y “O”, los detalles de dicha combinación se muestran a continuación:

- **Concepto B-E-Q-O:** la diferencia entre este concepto y el anterior, Concepto B-E-Q, es la inclusión de las señales de activación por señales por HMI, donde este dispositivo también ayuda a visualizar las inspecciones realizadas así ayudando al operario a tener una noción del procedimiento que se está realizando. En la Figura 5.43 se muestra la tabla de combinación de este concepto.

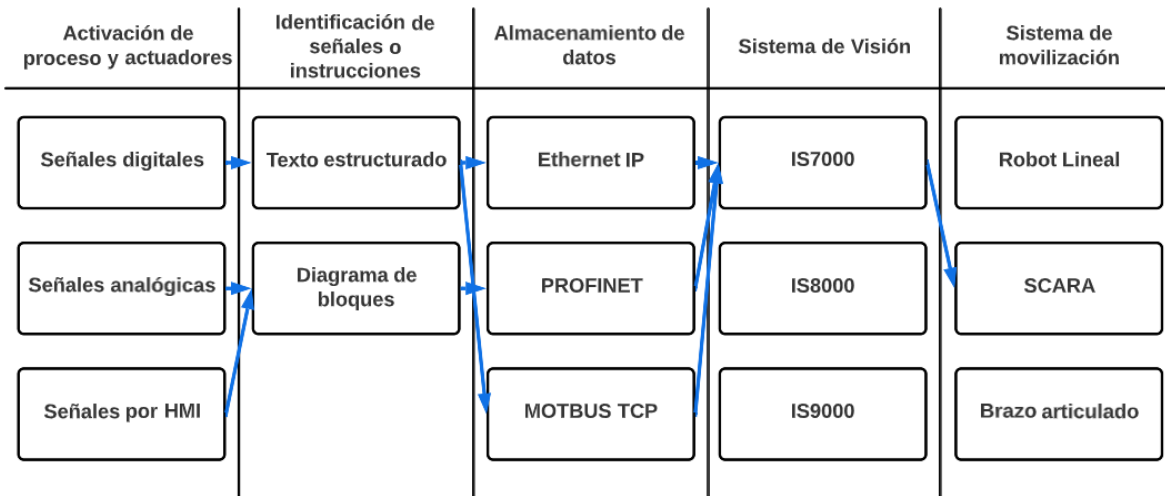


Figura 5.43 Tabla de combinación del concepto B-E-Q-O. Elaboración propia

Finalmente, para finalizar el proceso de filtrado se realiza la última tabla de filtrado para incluir el último concepto generado. En la tabla A.3 se observa la tabla de comparación del filtrado final.

Debido a esta última etapa del filtrado se identifican los conceptos con mejores calificaciones después de realizar combinaciones para obtener conceptos más robustos y con mayor potencial, dichos conceptos son los que continúan a la etapa final donde se realiza la evaluación total comparado con las métricas. En este caso es importante mencionar que cada uno de los conceptos se comentaron tanto con la ingeniera de aplicaciones como con el asesor y gerente de la empresa para obtener de sus opiniones las últimas recomendaciones y retroalimentaciones.

Por parte de la ingeniera y el gerente se realiza la retroalimentación de que para este tipo de aplicación es poco común obtener una señal de activación por medio de una señal analógica, debido a que esta inicialización ocurre normalmente oprimiendo un botón o con la activación de un sensor con salida digital para que ese valor de “1” active e inicie el proceso de inspección, por lo que es importante reevaluar si es necesario contemplar las señales analógicas en el diseño de la estación.

Finalmente, se decide continuar con los conceptos resultantes de los procesos de filtrado, “N”, “P”, “R” y “B-E-Q-O” para el proceso de evaluación donde en esa etapa es donde se elige cual concepto es el elegido como solución.

#### 5.4.2. Evaluación

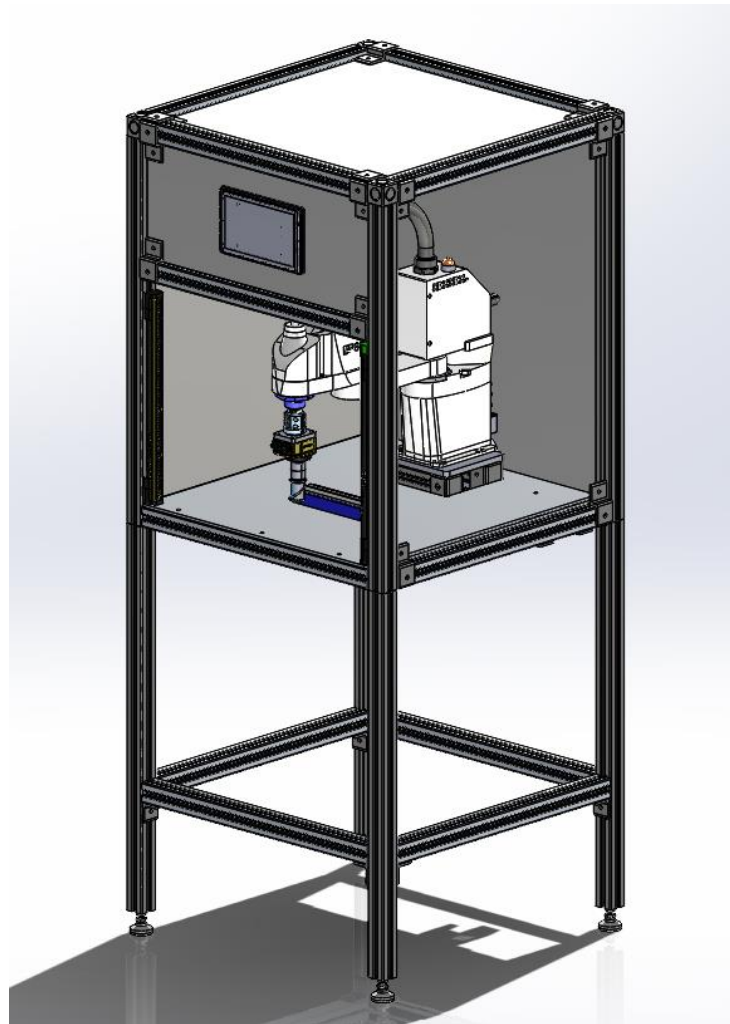
En esta etapa se evalúan los 4 conceptos resultantes del proceso de filtrado contras los criterios de selección y su peso asignado, todo en base a una escala del 1 al 5, donde el 1 es el desempeño menor y el 5 el desempeño mayor, es importante mencionar que el valor medio que en este caso es el 3, es el valor de referencia que se utiliza, este es la referencia con el sistema que se maneja actualmente. Al realizar esta evaluación califica el desempeño de cada concepto para obtener cual concepto cuenta con un ponderado más alto, esto basándose en los pesos de importancia de la tabla 5.6, así el concepto con el ponderado mayor es el que se va a desarrollar y validar en la siguiente sección del documento.

En la tabla A.4 se detalla el proceso de evaluación realizado y como se puede observar el concepto que genera mejor rendimiento por su ponderado es el concepto “B-E-Q-O” por lo que es el concepto que se elige para desarrollar como solución al problema principal planteado al inicio de este proyecto.

#### 5.5. Propuesta de diseño de prototipo

En la siguiente sección se procede seleccionar los equipos a utilizar para la inspección de forma definitiva entre los sistemas de visión, brazo robótico tipo escara y demás accesorios necesarios para el sistema de visión. También se muestra el diseño de la estructura mecánica que soporta los equipos encargados de realizar la inspección, además se diseña el soporte de las piezas a inspeccionar donde deben se debe asegurar la correcta colocación de las mismas. Durante este proceso de aprecia la forma en que se diseña la estructura y las decisiones tomadas para el diseño del prototipo junto con sus respectivos cálculos y simulaciones. En la

Figura 5.44 se muestra el resultado de la estructura diseñada junto con los componentes que se definieron en la sección.



*Figura 5.44 Propuesta de diseño mecánico. Elaboración propia*

### 5.5.1. Selección de equipos

#### **Sistema de visión**

Según la sección anterior entre el diseño a desarrollar se seleccionó para el sistema de visión la familia de cámaras de Cognex In-Sight 7000, dentro de esta familia existen diferentes modelos con características similares, pero con pocas diferencias entre sí. En la Figura A.10 de la sección de Anexos se muestra una tabla

comparativa de los modelos de la familia In-Sight 7000 donde la diferencia más grande entre ellas es la resolución de la cámara o de la imagen que pueden adquirir.

Por este motivo se procede a elegir el modelo IS7802 que cuenta con 2MP de resolución, esto quiere decir que puede adquirir una imagen de 1200 pixeles x 1600 pixeles, lo cual comparado con los otros modelos genera una imagen de mejor calidad y más detallada. De igual manera la selección entre a Color y Monocromática se determina con resultado en una cámara monocromática ya que una imagen a color de la misma resolución tiene una calidad menor debido a que un pixel a color se determina por cuatro pixeles en total, 1 Rojo, 1 Azul y 2 Verdes, con la combinación y variación de intensidad de esos 4 pixeles se logra obtener un pixel completo de cualquier color. Mientras que un pixel monocromático solo está compuesto por 1 solo pixel, lo que varía es su intensidad por lo que puede variar en una escala de grises.

Es importante destacar que todos los sistemas de visión son capaces de separar las imágenes inspeccionadas entre resultados buenos y malos, estos son enviados a un computador donde se pueden almacenar los datos.

## **Iluminación**

Para el proceso de inspección de piezas la iluminación cumple un papel muy importante, ya que dependiendo del área donde se realice este proceso puede haber variedad de luz ambiente y con esto se ven afectados los resultados de las inspecciones, además también hay que tomar en cuenta el tipo de inspección que se desea realizar para la escogencia de luz ya que si se desea comprobar presencia/ausencia de un objeto o seña no se necesita lo mismo que si se desea realizar un proceso de medición por parte del contorno de la pieza como tal.

En este caso se consulta con la ingeniera de la empresa debido a su experiencia en trabajar con sistemas de visión y la recomendación que hace es utilizar una luz tipo backlight debido a que la inspección que se desea realizar en esta estación y producto es del modo de dimensionamiento por parte del contorno,

esto hace que se requiera que la diferencia entre la pieza y el fondo sea muy marcada para que las herramientas funcionen de la mejor manera. En la Figura 5.45 se muestran la forma en que cambia una imagen obtenida debido a sus diferentes tipos de iluminación. Se utiliza un backlight con dimensiones de 48 mm x 216 mm, para que sea posible abarcar el largo de los productos y además calen varias piezas al mismo tiempo para su inspección.

	Metal part (automotive part)	Circuit board (electronic part)	Can (food)	PET bottle (drink)
Ring Lights				
LDR2 series 				
Dome Lights				
HPD2 series 				
Flat Dome Lights				
LFX3 series 				
Flat Lights				
TH2 series 				
Bar Lights				
LDL2 series 				

Figura 5.45 Diferencia de imagen obtenida según iluminación del objeto [39]

## **Robot SCARA**

Dentro de la categoría de robot SCARA también existen diferentes modelos y marcas, dentro de los cuales Kopar trabaja con la distribución de la marca EPSON Robots, por lo que se procede a investigar dentro del catálogo de dicha marca para evaluar las opciones que pueden funcionar como solución al sistema de movilización.

Dentro del catálogo de EPSON Robots se observa que en la categoría de robots SCARA cuentan con diferentes líneas como lo son la Serie TB, Serie LSB, Serie RS, Serie GX y por último la Serie G, y dentro de cada línea se encuentran diferentes modelos, especialmente separados por la cantidad de masa que pueden levantar van desde 1kg a 20kg. Los modelos que se consideran para esta aplicación son los que tienen capacidad de levantar la menor cantidad de masa de cada modelo debido a que lo que se necesita movilizar con el robot es la cámara y el sistema de acople que se vaya a diseñar.

En la serie TB el modelo con menor capacidad es el TB3, en la serie LSB es el LSB3, en la serie RS es el RS3, en la serie GX es el GX4 y finalmente en la serie G es el G1, pero debido a que el alcance de este último modelo se considera limitado por las dimensiones de la pieza que se debe inspeccionar, por esta razón el modelo considerado es el G3. En la Tabla 5.7 se realiza una comparación de los modelos mencionados.

Tabla 5.7 Comparación de modelos de SCARA.

Especificación	T3-B	LS3-B	RS3	GX4	G3
Alcance	400 mm	400 mm	350 mm	200/300/350 mm	200/300/350 mm
Repetitividad	± 0.02 mm	± 0.01 mm	± 0.01 mm	± 0.008 mm / ± 0.01 mm	± 0.008 mm / ± 0.01 mm
Carga máx.	3 kg	3 kg	3 kg	4 kg	3 kg
Tiempo de ciclo	0.52 s	0.42 s	0.34 s	0.33/0.34/0.35 s	0.29/0.30 s
Controlador	RC700A	RC90	RC700A	RC700D	RC700A
Controlador embebido	Si	No	No	No	No
Alimentación	110 - 240 V	200 - 240 V	200 – 240 V	200 – 240 V	200 – 240 V
Instalación	Piso	Piso	Techo	Piso / Techo	Piso / Techo
Disponibilidad	Si	No	No	No	No
Precio	\$ 8 500	\$ 10 725	\$21 225	\$ 20 375	\$ 16 925

Fuente: [40]

Utilizando la tabla anterior como referencia para escoger el modelo de robot con respecto a la aplicación que se requiere solucionar se escoge el Robot SCARA T3-B, la selección de este modelo se debe a que, aunque los otros modelos tengan mejor tiempo de ciclo esta aplicación no necesita de altas velocidades, y la repetitividad con la que cuenta cumple con lo necesario para la aplicación debido a que las mediciones que debe de realizar la medida más pequeña que puede variar

es 1mm por lo que no hay problema con su medida de repetividad. Otros aspectos en los que tiene ventaja es la capacidad de ser alimentado con 110V lo cual facilita que se pueda alimentar sin necesidad de una conexión especial, su controlador lo tiene embebido en la estructura por lo que su instalación es más fácil y además utiliza menos espacio que los otros modelos, el precio además es el menor de todos por lo que es más factible su compra y finalmente, se cuenta con la disponibilidad del equipo en las instalaciones de Kopar.

## HMI

Con respecto a la interfaz entre humano y la maquina se propone utilizar el sistema de Cognex llamado Visión View, el cual es una pantalla táctil donde se pueden observar las inspecciones que se realizan y además interactuar directamente con el sistema pues el menú u opciones son editables en el software de programación de la cámara. En la Figura 5.46 se puede observar el HMI de Cognex.



Figura 5.46 HMI Cognex Visión View 900. [28]

## Fuente de alimentación

Como fuente de alimentación se mencionó anteriormente que se iba a utilizar la red eléctrica como solución a este subproblema. Para el caso del robot no hay ningún problema porque al poder alimentarse con 110 – 240 V se puede conectar a cualquier tomacorriente y recibir los 110 V necesarios, pero para el sistema de visión y el sistema de iluminación se necesitan alimentar con 24 V por lo que se necesita hacer uso de una fuente de alimentación capaz de convertir los 110 V de la red eléctrica a los 24V necesarios para los dispositivos. Para la selección de una fuente de alimentación se debe considerar el voltaje de entrada y de salida, así como la corriente capaz de entregar pues hay que tener en cuenta el consumo de cada dispositivo.

Para este caso el sistema de visión consume 1.5 A máximo según [28] y la luz consume 640 mA máximo según [39], por lo que se necesita una entrega de corriente de mínimo 2.14 A, para asegurar que la entrega de corriente sea suficiente y teniendo en cuenta que se puede conectar otros accesorios en un futuro se considera que una fuente de alimentación de 24 V y 5 A es un buen candidato para esta solución. Por esta razón se utiliza una fuente como la que se muestra en Figura 5.47.



Figura 5.47 Fuente de alimentación de 24VDC. [41]

## Protección eléctrica

Por parte de la ingeniera de Kopar se da la recomendación de utilizar una protección eléctrica para conectar los equipos y evitar problemas en la alimentación eléctrica, como lo es una sobre corriente mientras el equipo está trabajando y el equipo sufra algún daño o afecte su operación. En este caso el equipo que se recomienda es un producto de la marca Murr Elektronik llamado MICO Circuit Protection.

La función de este equipo es regular la corriente que pasa por cada salida, siempre que se sobrepase el valor de corriente fijado el dispositivo desconecta esa salida para evitar que el equipo conectado sufra daño alguno. Una de las ventajas de dicho equipo es que se puede configurar la corriente máxima que puede entregar por sus canales de salida. En este caso como la fuente es de 5 A se selecciona un MICO de 4 canales con ajustes de corriente de 1A – 2A – 3A – 4A en cada uno de ellos. En la Figura 5.48 se puede observar el dispositivo descrito.



Figura 5.48 Protección eléctrica MICO Circuit Protection. [42]

## Lente

Para la escogencia del lente que se tuvo en cuenta las dimensiones del producto que se desea inspeccionar. Como se mencionó anteriormente en la sección del Marco Teórico, el campo de visión depende de la distancia de trabajo y la distancia focal, en este caso se necesita inspeccionar dimensiones muy pequeñas (menores a 1mm) comparadas con su longitud, se debe tomar varias fotografías para poder inspeccionar el producto completo, para realizar una inspección a detalle de dicho producto el campo de visión debe ser de alrededor de 2.5mm x 3mm. Como se utiliza un sistema de visión de Cognex se procede a utilizar una herramienta de la marca para calcular el lente recomendado, dicha herramienta se llama Lense advisor se encuentra en [43].

La herramienta ayuda a calcular la distancia focal necesaria según la distancia de trabajo que se tenga y el campo de visión deseado. En la Figura 5.49 se muestra el proceso realizado para el cálculo del lente.


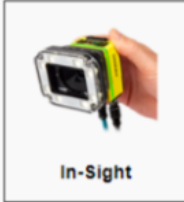

En la se muestra el resultado obtenido utilizando una distancia de trabajo de 150mm que es la distancia máxima que puede subir el 4to eje del Robot SCARA T3-B y un campo de visión de 2.5mm de altura por 3mm de ancho. Analizando el resultado de la herramienta, indica que se necesita un lente de 324mm de distancia focal, el cual no existe, por esta razón se considera utilizar un lente Macro. La función de este tipo de lente es obtener un enfoque bien definido de objetos muy pequeños, como en este caso, por lo que se utiliza un lente de la marca Opto Engineering, el lente seleccionado se muestra en la Figura 5.51.

Select a Measurement to Calculate

**Focal Length** | Field of View | Working Distance

Choose Unit: **mm** | cm | in

Choose a Product

 **DataMan** |  **In-Sight** |  **VisionPro**

In-Sight 7802

Enter Known Measurements

Working Distance\* (mm):

FOV Height (mm):

FOV Width (mm):

\*Working Distance is the distance from the body of the camera to the surface of the part

**Paso 1:** Seleccionar la medida a calcular

**Paso 2:** Seleccionar la unidad

**Paso 3:** Seleccionar el modelo de sistema de visión

**Paso 4:** Introducir los valores de distancia de trabajo, altura y ancho de campo de visión

**Paso 5:** Calcular

Figura 5.49 Proceso para cálculo de lente. [43]

	Focal Length (mm)	Working Distance (mm)	Width (mm)	Height (mm)
<b>Closest Higher</b>	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Exact</b>	324.0	150.000	3.333	2.500
<b>Closest Lower</b>	100.0	46.296	3.333	2.500

Figura 5.50 Resultados de cálculo de lente. [43]



*Figura 5.51 Lente MC3-03X macro. [44]*

### **Sistema de seguridad**

Según el diseño planteado el robot se encierra dentro de la estructura por seguridad contra algún accidente que pudiera provocar si está en funcionamiento y el usuario llegase a interferir en el recorrido del robot, en este caso solo se colocan barreras en los laterales y la parte trasera del robot, en el frente se deja abierto porque el usuario debe estar alimentando y retirando las piezas que se desean inspeccionar. Al tener todavía un sector del robot expuesto puede ocurrir algún accidente mientras esté funcionando el robot, por esta razón se debe implementar algún sistema de seguridad que en caso de que el usuario llegase a acercarse al robot o cruzar la zona de trabajo pueda detener la operación de inspección.

Ya que solo se debe cubrir una sección de la estructura se opta por utilizar unas cortinas de seguridad para así cuando el usuario cruce la parte frontal de la estructura, interrumpa los haces de luz de la cortina de seguridad y así se detenga la operación de inspección.

En este caso no se evalúa utilizar un escáner de seguridad porque estos equipos detectan presencia en cierta área alrededor del dispositivo, pero en este caso siempre se va a encontrar un usuario en la cercanía del sistema de inspección por lo que siempre habría una interrupción de la operación. Un ejemplo de las cortinas de seguridad que se utilizan para el diseño de la estación se pueden observar en Figura 5.52.



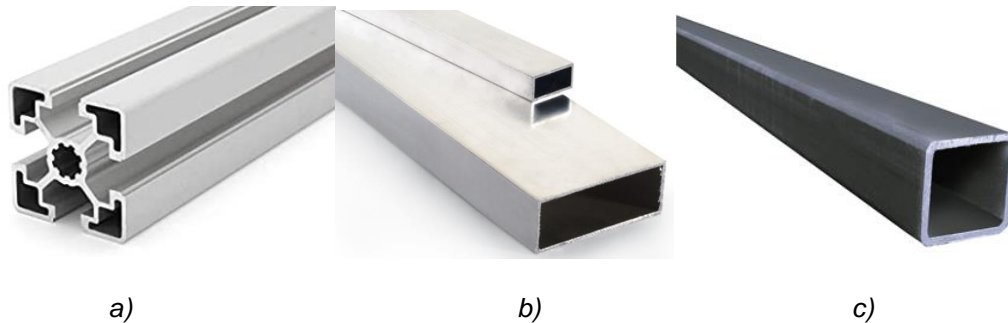
Figura 5.52 Cortinas de seguridad. [52]

### 5.5.2. Diseño mecánico de la estructura

En esta sección se procede a diseñar la estructura planteada para soportar la estación de inspección junto con el soporte del embobinado. Los siguientes puntos son necesidades que se deben cubrir según la escogencia del equipo a utilizar:

- **Colocación del producto a inspeccionar:** el soporte debe ser capaz de mantener el producto a inspeccionar en una posición correcta durante el proceso de inspección.
- **Adaptable:** en caso de que se dé un cambio en el producto, la estructura y el sistema de inspección debe ser de fácil adaptación a los cambios.
- **Soporta los dispositivos:** es capaz de soportar los movimientos del sistema de movilidad y los pesos de los diferentes dispositivos y piezas que se coloque encima de la estructura.

Para iniciar con el diseño mecánico se tomaron en cuenta diferentes materiales y tipos de estructura que pudieran ser funcionales, así como capaces de soportar el peso de los componentes y parte de su movimiento sin que esto afectara en el proceso de inspección. Dentro de estos se encuentran: perfiles de aluminio 6063, tubos de acero inoxidable 304 y tubo de hierro negro rectangular. En la Figura 5.53 se puede observar un ejemplo de los materiales mencionados.



*Figura 5.53 Tipos de materiales para estructura. a) Perfil de aluminio [45] b) Tubo acero inoxidable [46] c) Tubo hierro negro [47].*

Cada uno de los materiales recién mencionados cuentan con sus ventajas y sus desventajas las cuales fueron críticas para la selección del material, el cual se utiliza para el diseño de la estructura mecánica.

#### **Perfil de aluminio.**

- Ventajas: es de material ligero, material limpio para utilizar en empresas médicas, resistente a grandes cargas, facilidad de encontrar en el mercado, variedad de tamaños y accesorios, no requiere maquinado para formar estructuras, no se oxida, facilidad de modificar las estructuras una vez construidas.
- Desventajas: es un poco costoso comparado con otros materiales.

#### **Tubo de acero inoxidable.**

- Ventajas: Material ligero, material limpio para utilizar en empresas médicas, resistente a grandes cargas, facilidad de encontrar en el mercado, no se oxida.

- Desventajas: requiere maquinado para hacer ensambles de estructuras, es costoso comparado con otros materiales, necesita soldadura para unir 2 o más tubos, dificultad para modificar las estructuras una vez construidas.

#### **Tubo de hierro negro.**

- Ventajas: Material económico comparado a otros materiales, fácil de encontrar en el mercado, resistente a grandes cargas.
- Desventajas: necesita maquinado para realizar estructuras, material pesado, se oxida, dificultad para modificar las estructuras una vez construidas.

Debido a los requerimientos anteriores y sus ventajas sobre los otros materiales tomados en cuenta se opta por utilizar perfiles de aluminio para la creación de la estructura. También estos perfiles son de uso común en la mayoría de las estructuras mecánicas utilizadas en la industria gracias a la facilidad de ensamble en diferentes geometrías, además de que su forma permite que el acople de diferentes equipos, adaptadores o accesorios sea versátil al únicamente necesitar tornillos y tuercas (generalmente autoalineables). Según [45] los perfiles de aluminio tienen la ventaja de ser livianos y adaptables, además de su robustez son capaces de resistir una gran cantidad de peso, sirviendo como conexión o cierre entre estructuras.

En la Figura 5.54 se observa la estructura base que soportara los dispositivos y accesorios a utilizar en el sistema de inspección, esta estructura es diseñada utilizando la unión de varios perfiles de aluminio con sus respectivos accesorios de soporte. Esta se considera como crítica por lo que los estudios de esfuerzos se realizaran sobre ella y sus piezas más importantes que es donde se acoplan los componentes más pesados.

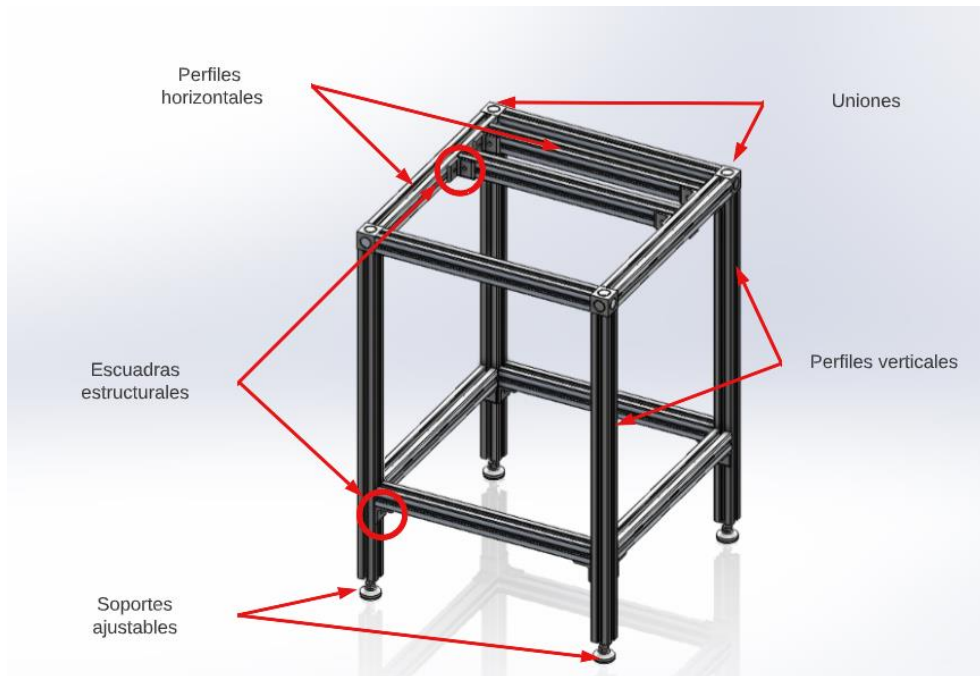


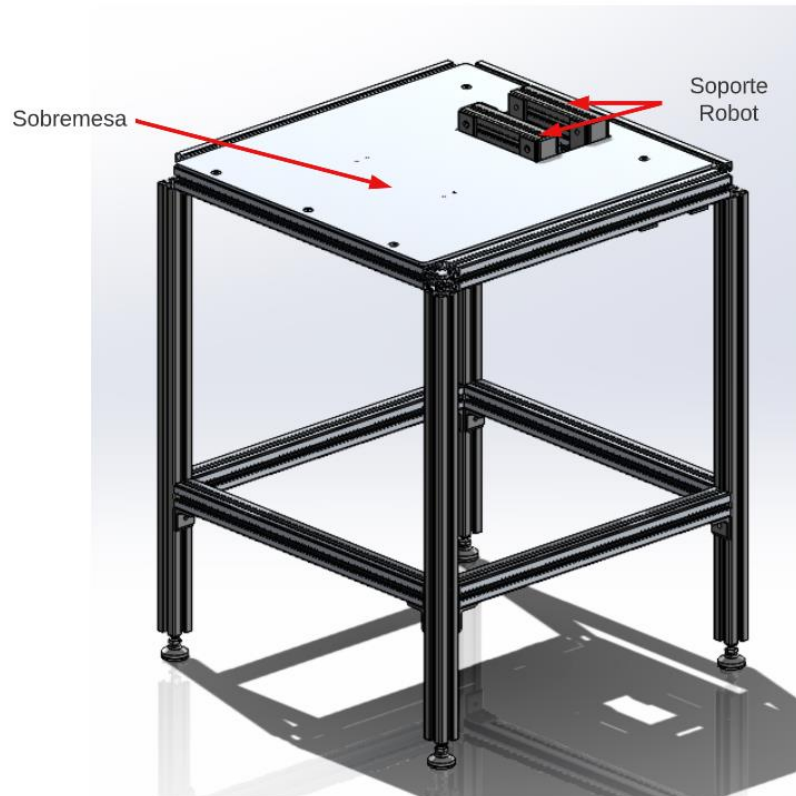
Figura 5.54 Estructura principal. Elaboración propia

Como soporte de la estructura se utilizan unos soportes de montaje de nivelación ajustable como los que se muestran en la Figura 5.55, para asegurar que el armazón está fijo en el suelo con la posibilidad de nivelar cada uno de los perfiles verticales y así obtener una nivelación totalmente horizontal, facilitando que el sistema de inspección no se vea afectado por inclinación de los componentes. Además, en el extremo inferior del soporte se cuenta con una almohadilla antideslizante con el fin de que la estructura no tenga ningún tipo de desplazamiento por alguna fuerza externa o por el mismo movimiento del actuador. Todos los perfiles utilizados en el armazón de la estructura son de medida 45mm x 45mm de material aluminio 6063.



*Figura 5.55 Soporte de nivel ajustable. [45]*

Para la colocación y sujeción del robot se utilizan dos perfiles de aluminio posicionados sobre los perfiles horizontales que encuentran en medio de la estructura base, el motivo de colocarlo de esta manera es agregar altura al robot, 45mm, para que el sistema de visión y el lente puedan ajustarse a la altura necesaria sin tener que interferir con las piezas a inspeccionar ni los accesorios que se utilizan para realizar la inspección. Además, se coloca un sobre de aluminio 6061 de 6.35mm de espesor para colocar objetos, en este caso sería la luz y el soporte para las piezas, de igual manera se diseña con ese grosor en caso que se necesite colocar alguna herramienta o pieza que tenga un peso mayor y no afecte la estructura. En la Figura 5.56 se muestra los perfiles donde se sujeta el robot junto con el sobre mesa que se utiliza para la colocación de las piezas.



*Figura 5.56 Soporte para robot y sobremesa. Elaboración propia*

Según [48] se recomienda utilizar una placa adaptadora para el robot de al menos 20mm de espesor si el dispositivo va a ser utilizado a altas velocidades para que ayude a soportar las vibraciones que puede causar el robot, pero en este caso para este tipo de inspecciones no se necesita que el robot avance a altas velocidades, por lo que se diseña una placa de  $\frac{1}{2}$  pulgada pues es lo bastante robusta para la sujeción. El material utilizado para esta placa se considera el AISI 1020 por sus propiedades. En la Figura 5.57 se muestra la placa de sujeción del soporte agregada a la estructura mecánica.

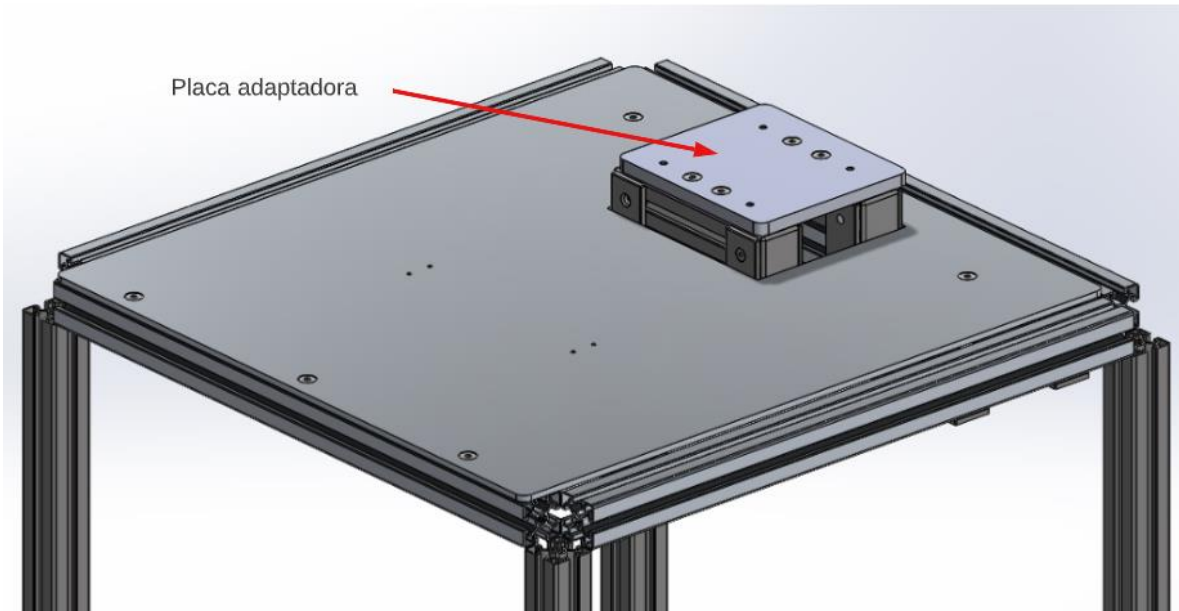


Figura 5.57 Placa adaptadora para Robot. Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 5.58 se muestra la estructura mecánica con sus respectivas dimensiones. Es importante tener en cuenta que todos los planos de las piezas se encuentran en la sección Apéndice I, para una mejor visualización de las dimensiones de cada componente.

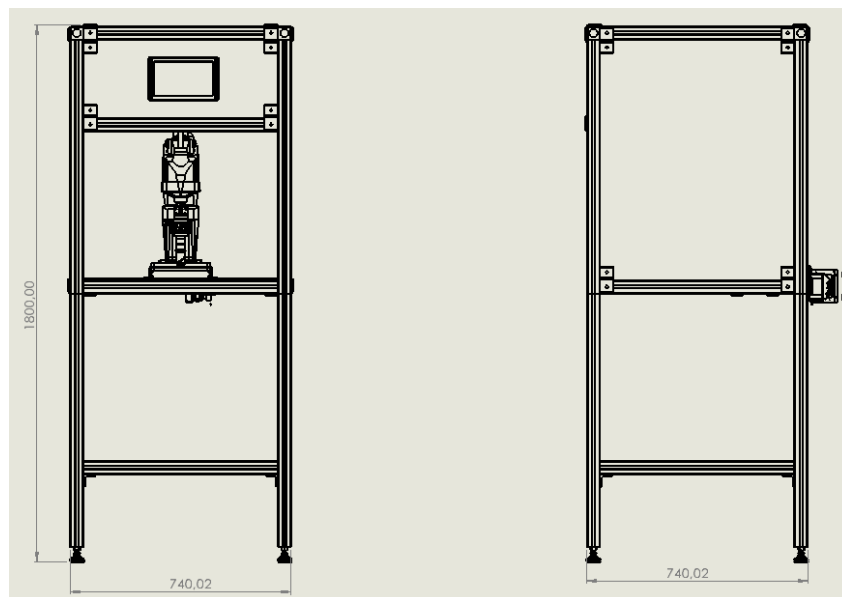


Figura 5.58 Dimensiones generales de la estación de inspección (cotas en mm). Elaboración propia

### 5.5.3. Diseño mecánico de la herramienta del robot

Cuando se habla de la herramienta del robot es aquella que está localizada o sujeta al último eje la cual se utiliza para una tarea en específico. Generalmente estas herramientas se utilizan para hacer una acción de *Pick and Place* o recoger y poner, por lo que puede variar entre un sistema de vacío o la utilización de pinzas para recoger las piezas.

En el caso de este proyecto la tarea que debe realizar el robot no es de *Pick and Place*, si no que se utilizara para sujetar el sistema de visión y movilizarlo a lo largo del producto para realizar la inspección, por este motivo se debe diseñar un soporte para sujetar la cámara al último eje del robot.

En la Figura 5.59 se observan las dimensiones de la parte inferior del último eje del robot, el cual está ajustado para sujetar herramientas desde ahí. Por esta razón utilizando estas medidas se procede a diseñar la herramienta de sujeción de la cámara utilizando las medidas de referencia.

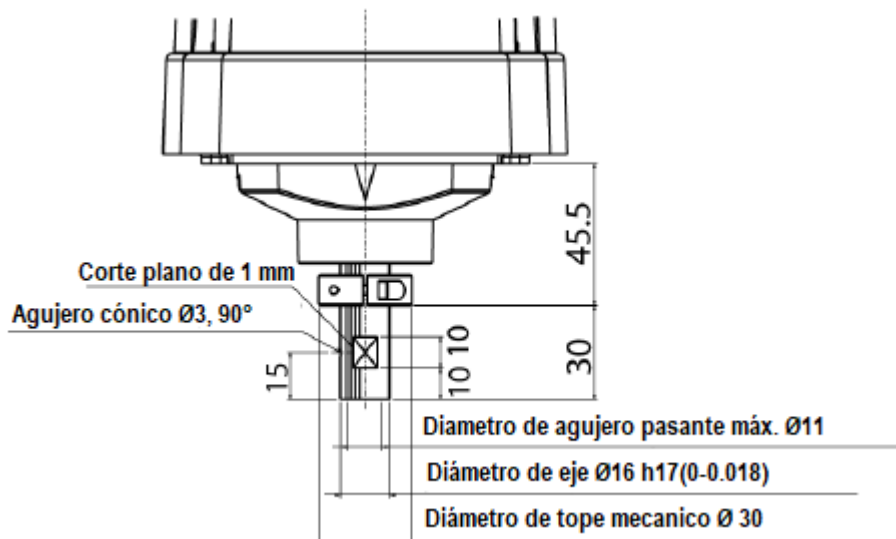
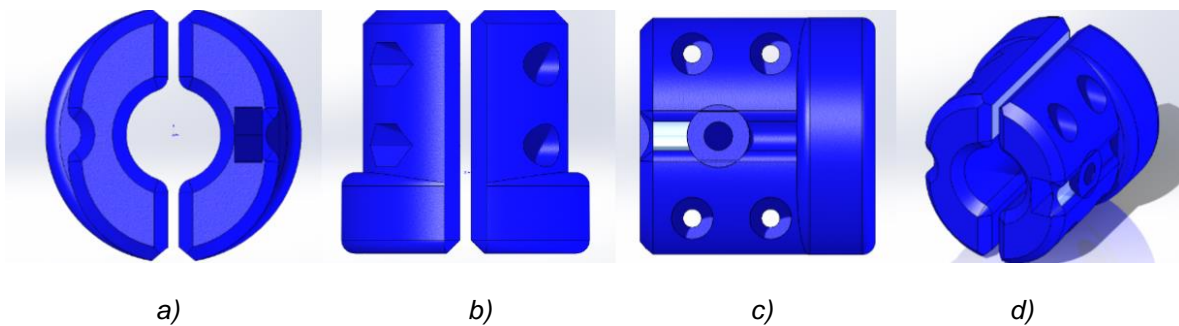


Figura 5.59 Dimensiones del ultimo eje del Robot T3-B. [48]

Como se mencionó anteriormente las medidas de la Figura 5.59 se utilizan para diseñar el acople de la cámara al robot, este mismo se diseñó en 2 partes, uno será una placa adaptadora para la cámara y la segunda es el sujetador directo al

último eje del robot. Es importante tener en cuenta que esta herramienta debe diseñarse de un material liviano ya que el robot tiene una capacidad máxima de carga de 3kg, el sistema de visión tiene una masa de 240g [28], por lo que aún se tiene mucho rango para la herramienta, de igual manera no hay que sobredimensionar el acople. Para el prototipo del laboratorio de Kopar se utilizó la impresora 3D para fabricar dicho acople, el material utilizado fue filamento de plástico PLA, con un 30% de relleno y con calidad de 50%, dicho diseño se puede observar en la Figura 5.60. Entre las características importantes de este primer acople es que es ajustable al diámetro del eje del robot y cuenta con un agujero en uno de sus lados para un tornillo que ayuda a sujetar el acople al eje en la parte del corte plano, esto ayuda a evitar la rotación del mismo.



*Figura 5.60 Acople Cámara - Robot: a) Vista superior, b) Vista frontal, c) Vista lateral, d) Vista inferior. Elaboración Propia*

Para la segunda parte del acople se necesita una placa del tamaño del reverso de la cámara con agujeros alineados con los diseñados para sujetar el sistema de visión. En la Figura 5.61 se puede observar las dimensiones a la que se debe acoplar la placa, esto junto con los agujeros centrales para conectar la placa al acople de la Figura 5.60

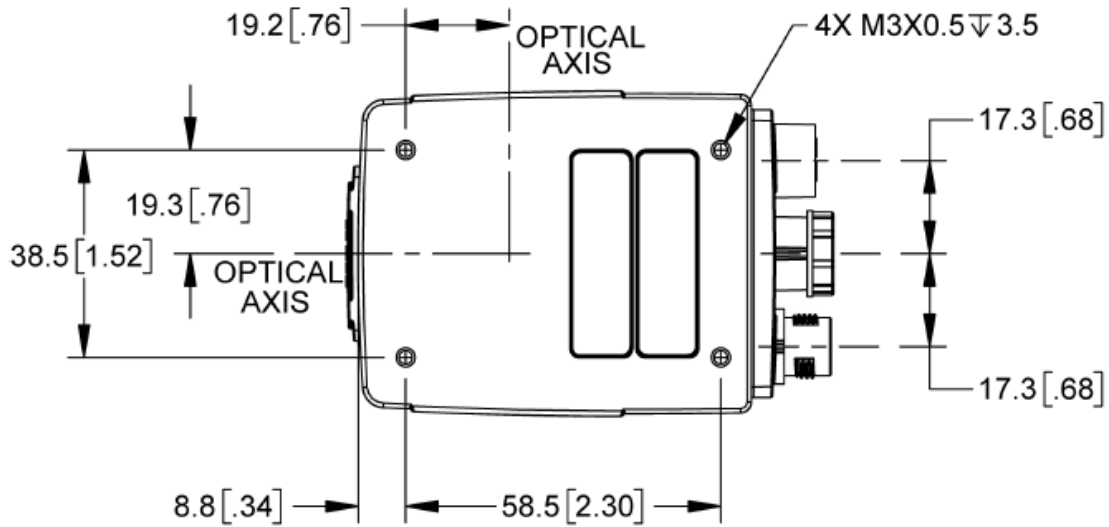


Figura 5.61 Dimensiones del reverso de la cámara IS7802. [28]

Utilizando las dimensiones del reverso de la cámara se procede a diseñar la placa adaptadora de la cámara. Esta se puede observar en la Figura 5.62. es importante mencionar que los agujeros para atornillar la placa con el acople deben esconder totalmente la cabeza del tornillo porque si no la cámara puede no quedar totalmente horizontal y esto afectar la inspección a realizar.

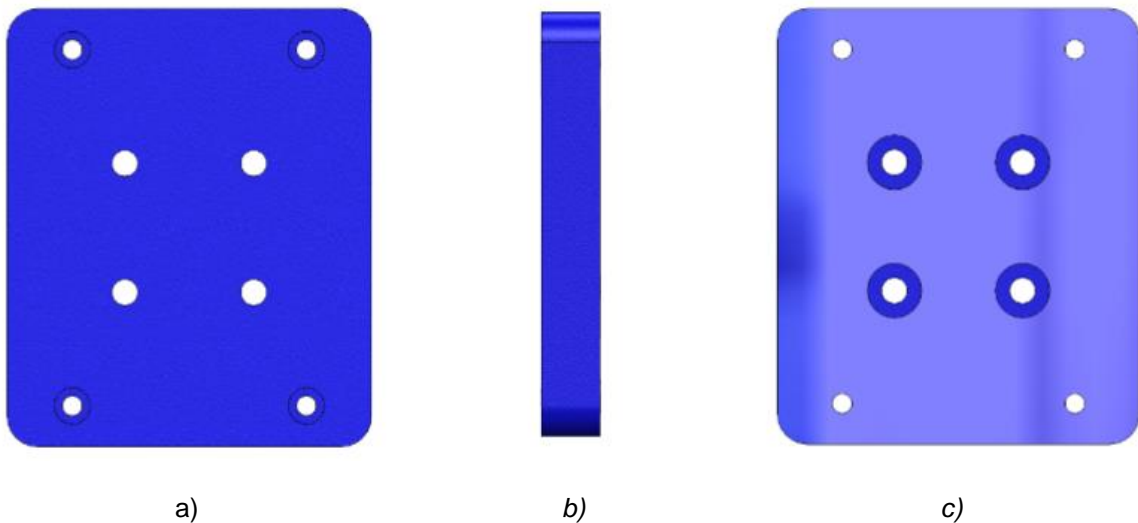


Figura 5.62 Placa adaptadora de la cámara: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista trasera.

Elaboración propia

#### 5.5.4. Diseño del soporte del producto

Como se mencionó desde la sección de introducción, el tipo de producto que se desea inspeccionar en esta estación es de diámetro menor a 1mm, pero de longitud mucho más grande, en este caso alrededor de 155mm, por lo que se diseñó un soporte para asegurar que productos de este tipo de características se coloquen de manera que siempre queden en la misma posición.

Para la validación de esta estación este proyecto está basado en la inspección de un embobinado, pero según conversaciones con el gerente de Kopar se quiso fabricar el soporte para colocar más de un producto a la vez. Por esta razón el diseño del soporte se hizo para colocar 4 productos a la vez. La manera para garantizar que todos los productos quedaran en la misma posición fue realizar una placa con canales en forma de “V”, así sin importar el diámetro siempre van a contar con apoyo por sus laterales a diferencia de si se realizaba en forma de “grapa” o “U”, que el ancho del canal no garantiza que el producto quede alineado ni soportado por ambos lados.

En la Figura 5.63 se puede observar el resultado del soporte para las piezas, además se observa un ejemplo de cómo quedaría un producto posicionado de 1mm y uno de 0.3mm. Es importante que el material de esta pieza deje pasar la luz ya que como la iluminación de la pieza va a ser desde la parte trasera para poder remarcar bien el contorno, este debe dejar pasar los rayos de luz. Para el prototipo fabricado para este proyecto se fabricó en policarbonato de color blanco para obtener una buena iluminación. De igual manera en uno de sus extremos no es abierto, esto para garantizar y facilitar la colocación de las piezas en la base, así siempre tendrán la posición correcta para realizar la inspección, este tope se puede observar en la Figura 5.64.

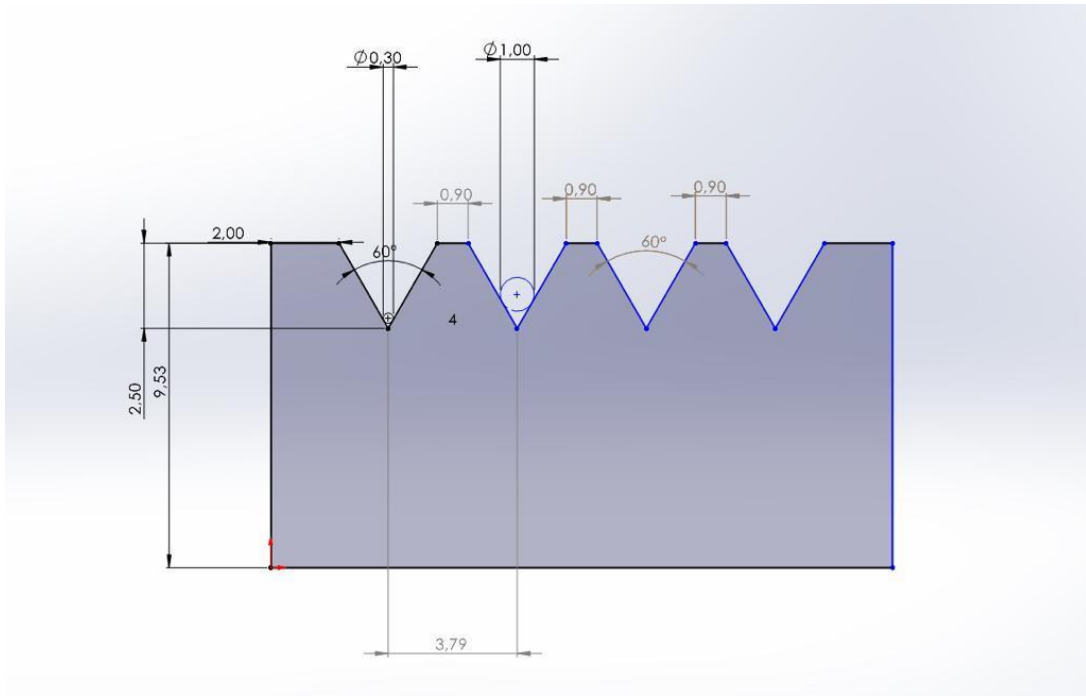


Figura 5.63 Soporte para producto a inspeccionar. Elaboración propia

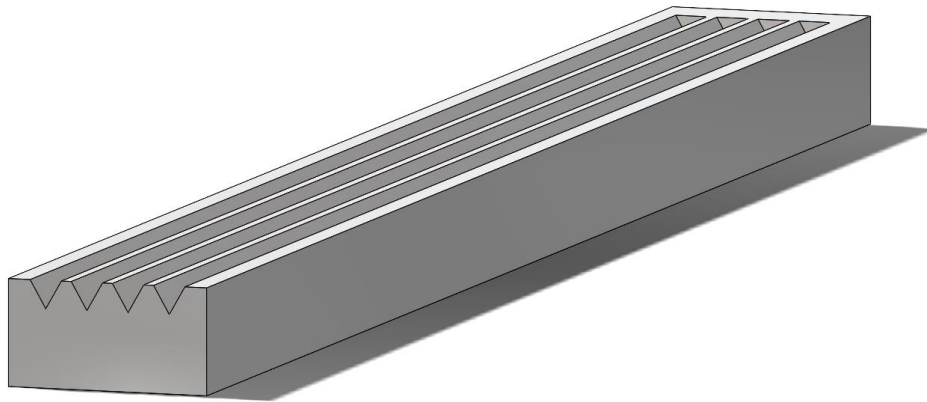


Figura 5.64 Isométrico del soporte para piezas a inspeccionar. Elaboración propia

Para avanzar finalmente a la siguiente sección donde se validan y analizan las decisiones tomadas en este capítulo, se puede observar el diseño final del prototipo en la Figura 5.44.

## Capítulo 6 Validación y análisis del sistema

### 6.1. Aspectos generales

En el Capítulo 3 se definió una tabla donde se mostraban las necesidades del clientes y criterios para definir si la solución propuesta en este proyecto es capaz de cumplir con cada una de ellas y así tener una solución general al problema planteado, en específico estas necesidades y su jerarquización por importancia se puede observar en la Tabla 3.1.

Esta sección se basa principalmente en mostrar y analizar los resultados obtenidos según el diseño que se decidió desarrollar según todo el proceso de diseño del Capítulo 5, además de eso se debe de comparar los resultados y comprobar que los objetivos planteados al inicio de este documento se cumplieron de manera satisfactoria.

Entre los puntos que se desean validar en esta sección está la verificación de que el sistema mecánico diseñado para la estación de inspección sea capaz de soportar todos los equipos y además de eso tener un factor de seguridad mayor a 1. Lo siguiente sería verificar que el sistema de visión es capaz de inspeccionar la pieza tal como lo pide su plano de referencia. También desarrollar el sistema de comunicación entre el sistema de visión y sistema de movilización por medio de un protocolo de comunicación. Finalmente poner a prueba todo el sistema de inspección y validar la solución.

## 6.2. Validación del sistema mecánico

Dentro de esta sección como se mencionó anteriormente se desea obtener la validación y el análisis de la estructura mecánica, por esta razón se aplica una evaluación solamente en las piezas y subensambles críticos del sistema, los cuales son las que soportan la mayor carga como el peso del robot, la sobremesa, la placa del robot y como tal la parte superior de la estructura. Según [48] el robot provoca una fuerza de reacción vertical de 900N, una horizontal de 500N y un torque de 150 N•m cuando se encuentra a su máxima capacidad realizando movimientos. Para esta aplicación no se necesita que el robot este a su velocidad máxima porque el proceso de inspección requiere su tiempo para tomar las fotografías y realizar su procesamiento, pero el análisis se hará como si fuera a su máxima capacidad para obtener los resultados en el caso más crítico.

El análisis que se realiza en estas piezas y ensambles se hace mediante el *software* SolidWorks, donde se pueden realizar diferentes tipos de simulaciones para obtener los datos de falla en los elementos. Se realizó el análisis de esfuerzo máximos bajo el criterio de VonMises, este criterio se utiliza debido a que es conservador y funciona muy bien con materiales dúctiles como lo es el aluminio 6063 el cual es el material de los perfiles extruidos.

El primer análisis que se realiza es sobre los perfiles horizontales que soportan el peso del robot. En la Figura 6.1 se puede observar datos y propiedades del ensamble a estudiar.

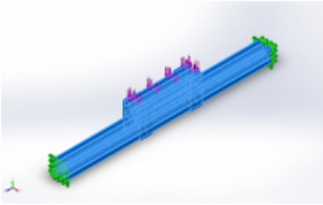
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<b>Nombre:</b> 6063-T6 <b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico elástico lineal <b>Criterio de error predeterminado:</b> Tensión de von Mises máx. <b>Límite elástico:</b> 2,15e+08 N/m <sup>2</sup> <b>Límite de tracción:</b> 2,4e+08 N/m <sup>2</sup> <b>Módulo elástico:</b> 6,9e+10 N/m <sup>2</sup> <b>Coefficiente de Poisson:</b> 0,33 <b>Densidad:</b> 2.700 kg/m <sup>3</sup> <b>Módulo cortante:</b> 2,58e+10 N/m <sup>2</sup> <b>Coefficiente de dilatación térmica:</b> 2,34e-05 /Kelvin	Sólido 1(Boss-Extrude1)(5537T718_T-Slotted Framing-1), Sólido 1(Fillet1)(5537T947_T-Slotted Framing(1)-1), Sólido 1(Fillet1)(5537T947_T-Slotted Framing(1)-2), Sólido 1(Fillet1)(5537T947_T-Slotted Framing(1)-3), Sólido 1(Fillet1)(5537T947_T-Slotted Framing(1)-4), Sólido 1(Boss-Extrude1)(Perfil 45x45 (450 mm-1)
Datos de curva: N/A		

Figura 6.1 Propiedades del ensamble soporte del robot, aluminio 6063. Elaboración propia

El análisis que se realiza en esta pieza es el peso del robot más la carga máxima total, serían 19kg equivalentes a 186N, a eso se agrega la fuerza vertical y la torsión que genera el robot a máxima velocidad. Los resultados de la simulación se pueden observar en las Figuras 6.2, 6.3 y 6.4.

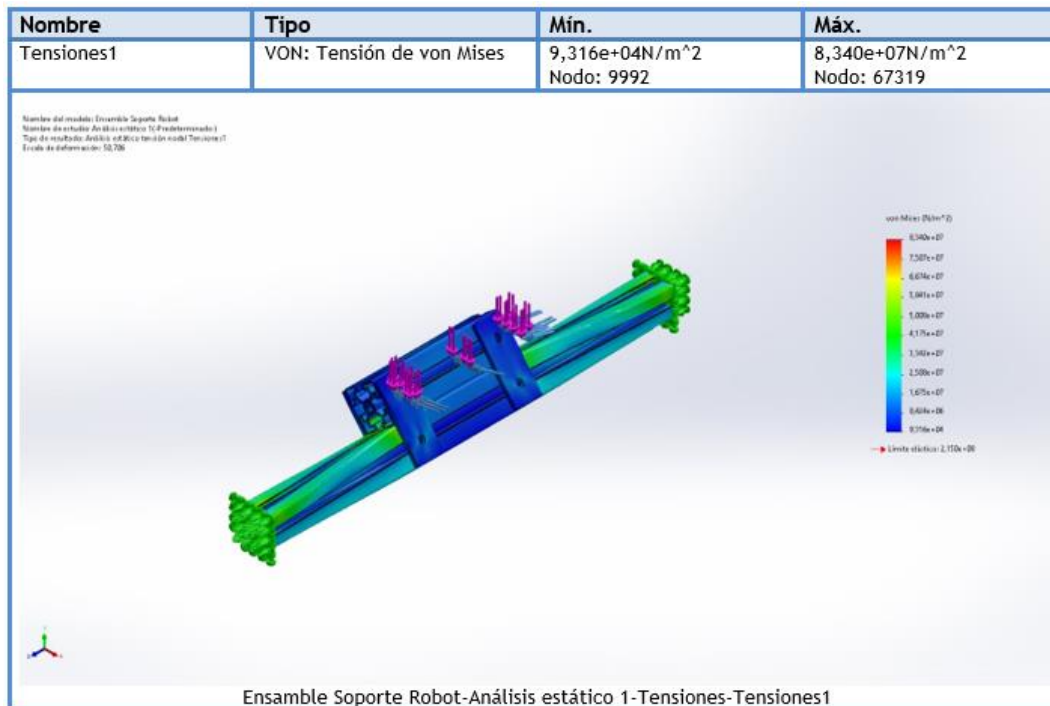


Figura 6.2 Análisis de tensión del ensamble soporte del robot T3-B. Elaboración Propia

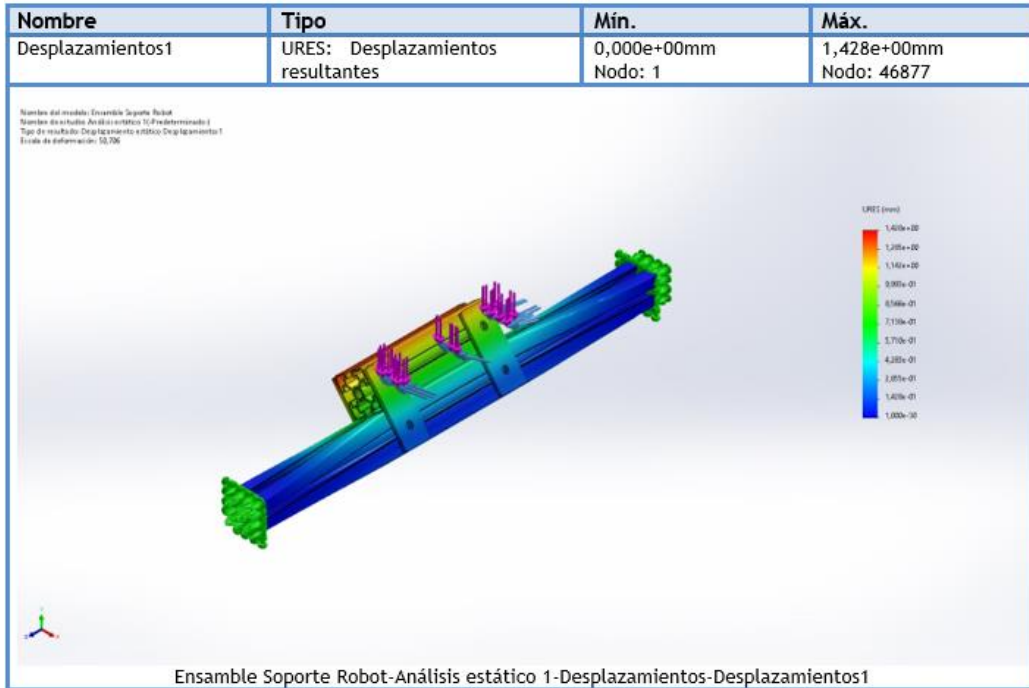


Figura 6.3 Análisis de deflexión del ensamble soporte del Robot T3-B. elaboración propia

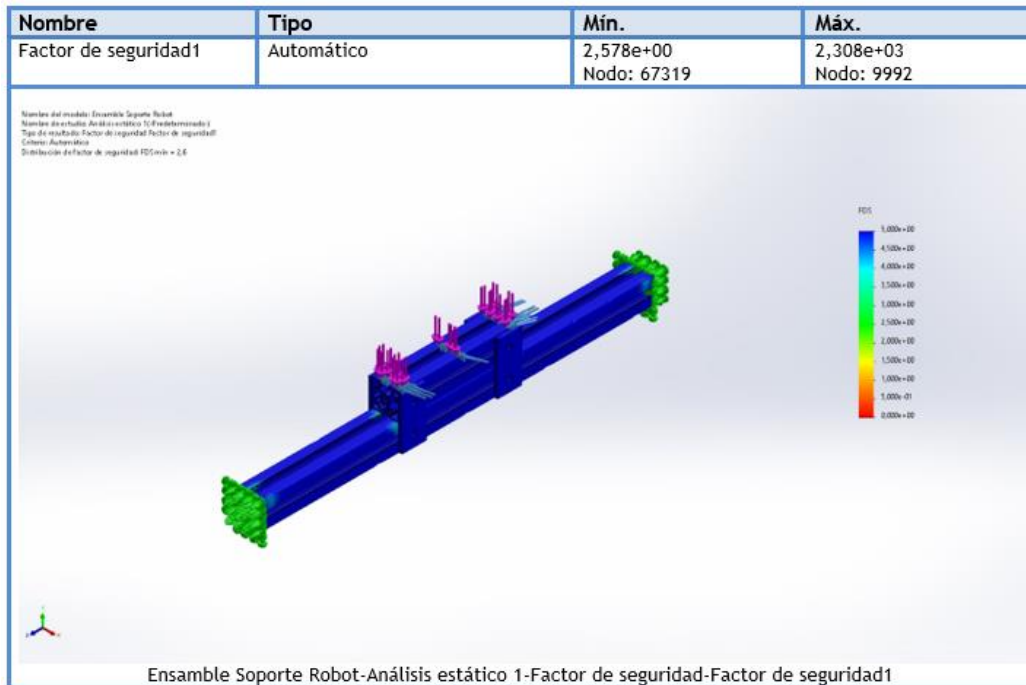


Figura 6.4 Análisis de factor de seguridad del ensamble soporte del robot T3. Elaboración propia

Al igual que el ensamble anterior, las mismas pruebas se realizaron en la placa de soporte del robot donde se encuentra sujeto el dispositivo. La placa para soporte del robot se utiliza el material Acero 1020 ya que debe ser más resistente que los perfiles de aluminio. Las propiedades físicas del material se pueden observar en la Figura 6.5 y el resultado de la simulación se puede apreciar en las Figuras 6.6, 6.7 y 6.8.

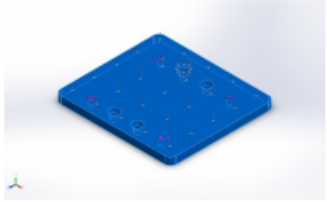
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1020            Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal            Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.            Límite elástico: <math>3,51571e+08 \text{ N/m}^2</math>            Límite de tracción: <math>4,20507e+08 \text{ N/m}^2</math>            Módulo elástico: <math>2e+11 \text{ N/m}^2</math>            Coeficiente de Poisson: 0,29            Densidad: <math>7.900 \text{ kg/m}^3</math>            Módulo cortante: <math>7,7e+10 \text{ N/m}^2</math>            Coeficiente de dilatación térmica: <math>1,5e-05 /\text{Kelvin}</math></p>	Sólido 1 (Avellanado para tornillo con cabeza plana avellanada de M81)(Base Robot)
Datos de curva:N/A		

Figura 6.5 Propiedades de la placa soporte del robot T3-B. Elaboración propia

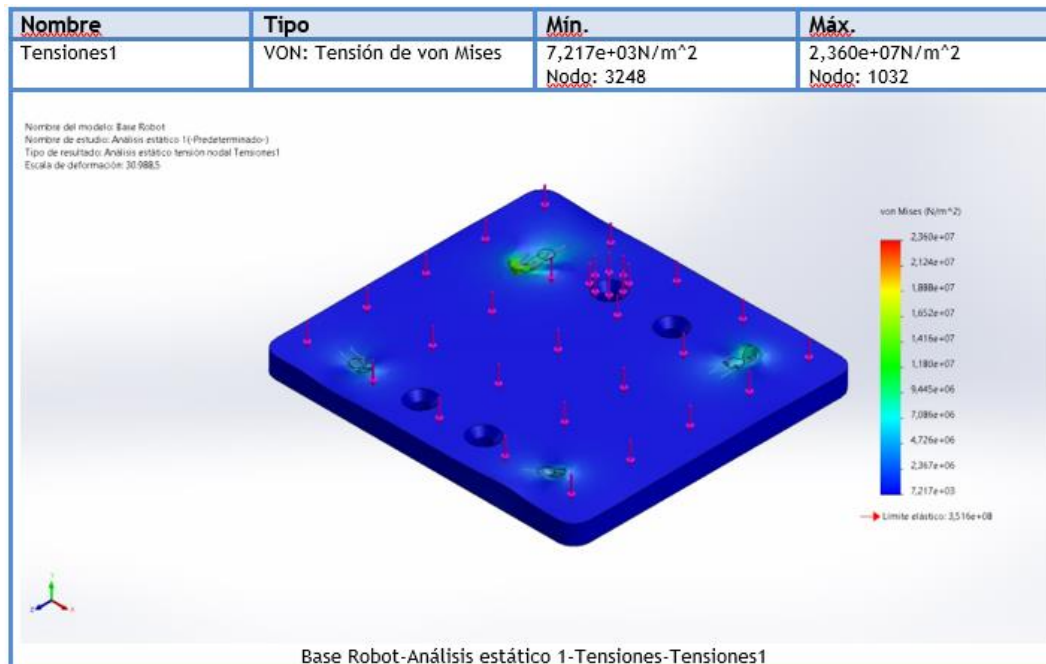


Figura 6.6 Análisis de tensión de la placa soporte del Robot T3-B. Elaboración propia

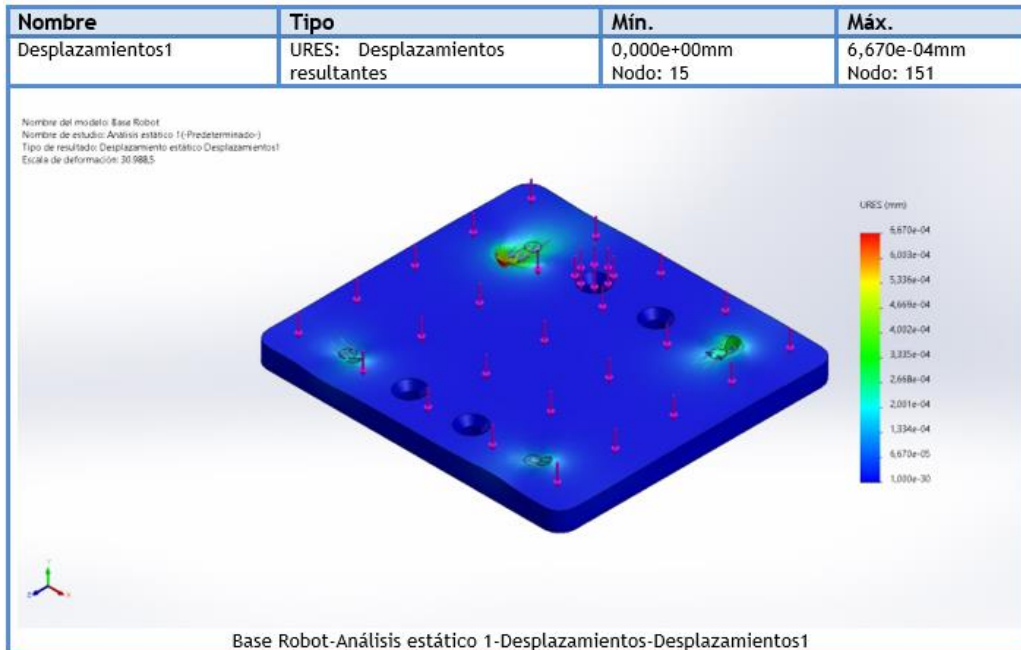


Figura 6.7 Análisis de desplazamiento de la placa soporte del Robot T3-B. Elaboración propia

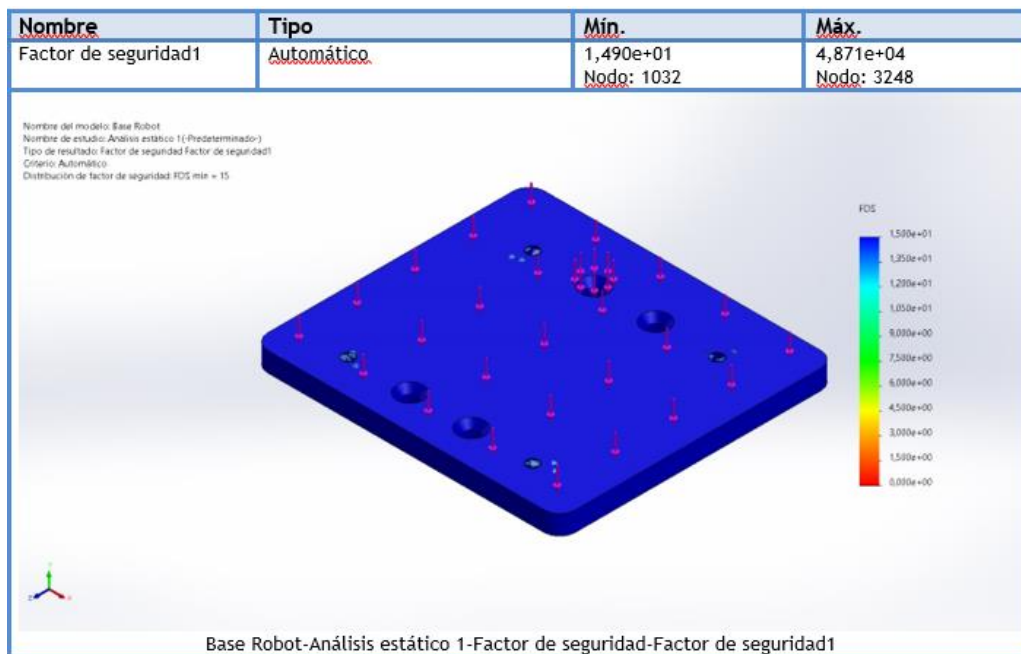


Figura 6.8 Análisis de factor de seguridad de la placa soporte del Robot T3-B. Elaboración propia

Finalmente, las últimas partes críticas donde se debe realizar el análisis, sería en los perfiles verticales de la estructura donde estará apoyado todo el peso del equipo. En este caso la carga que se analiza es el peso de la estructura que son 40kg equivalente a 393.6N más los 900N que genera el robot a gran velocidad sería un total de 1293.6N repartidos entre 4 perfiles verticales se tiene un total de 323.4N por perfil. En Figura 6.9 se puede observar las propiedades del perfil vertical y en las figuras 6.10 ,6.11 y 6.12 los resultados de la simulación.

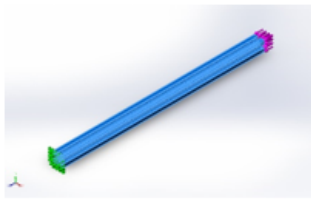
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 6063-T6            Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal            Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.            Límite elástico: 2,15e+08 N/m<sup>2</sup>            Límite de tracción: 2,4e+08 N/m<sup>2</sup>            Módulo elástico: 6,9e+10 N/m<sup>2</sup>            Coeficiente de Poisson: 0,33            Densidad: 2.700 kg/m<sup>3</sup>            Módulo cortante: 2,58e+10 N/m<sup>2</sup>            Coeficiente de dilatación térmica: 2,34e-05 /Kelvin</p>	Sólido 1(Boss-Extrude1)(5537T721_T-Slotted Framing)
Datos de curva:N/A		

Figura 6.9 Propiedades del perfil vertical. Elaboración propia

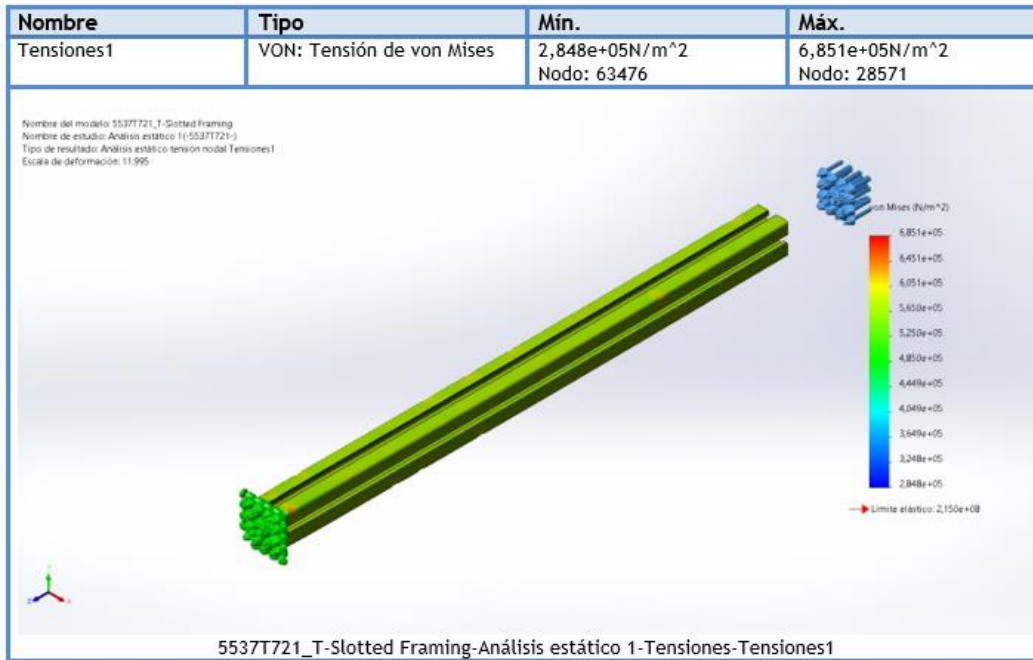


Figura 6.10 Análisis de tensiones del perfil vertical. Elaboración propia

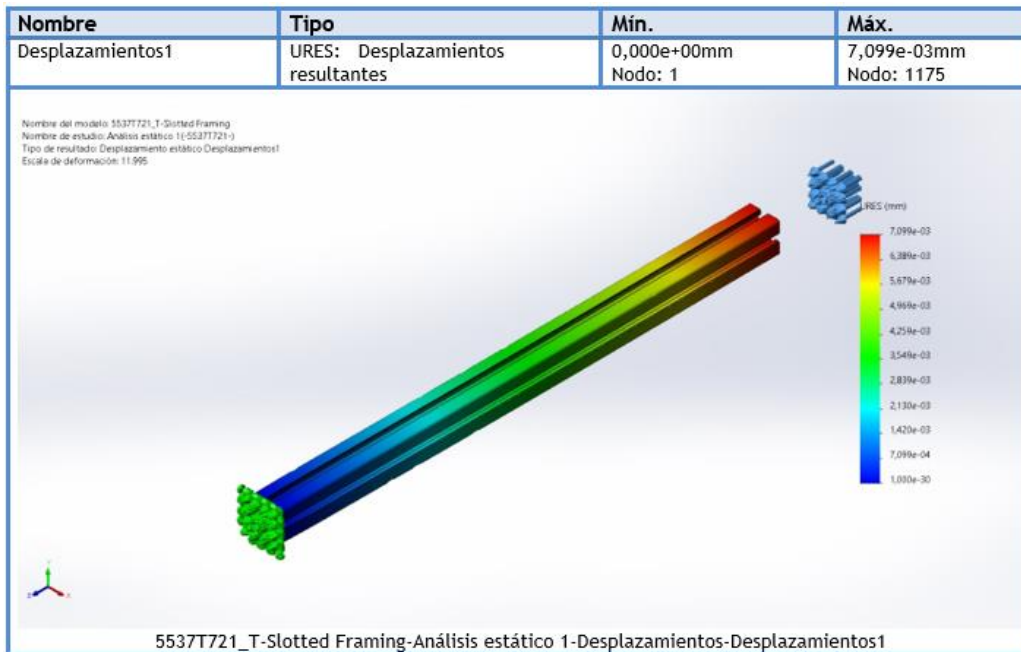


Figura 6.11 Análisis de desplazamientos del perfil vertical. Elaboración propia

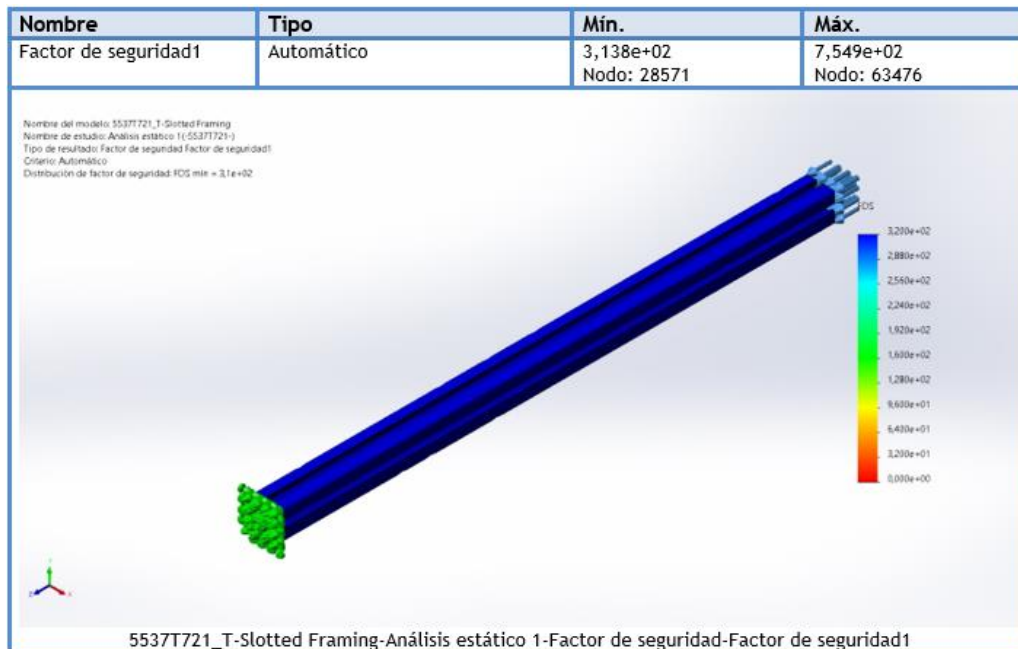
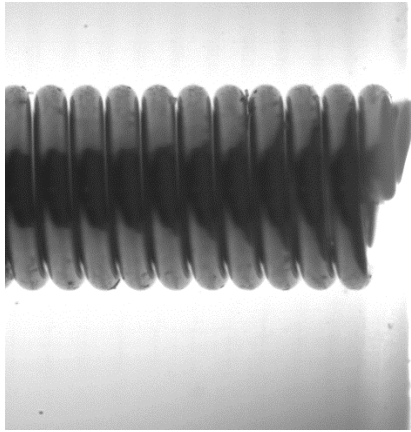


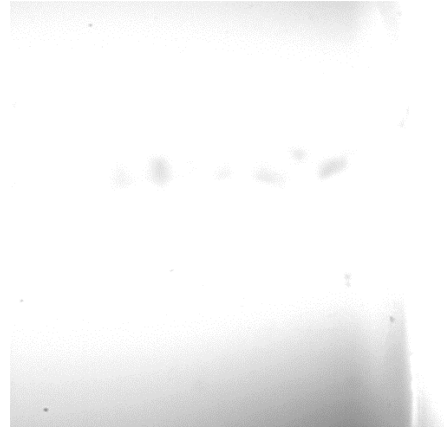
Figura 6.12 Análisis del factor de seguridad del perfil vertical. Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos de las simulaciones en los 3 casos analizados, se puede observar que el valor de factor de seguridad más bajo que se obtuvo es de 2.57. Esto indica que el diseño de la estructura es capaz de soportar los equipos en operación, además se debe recordar que las simulaciones se realizaron tomando el caso en que el robot operara a sus capacidades máximas de carga y de velocidad, y como se mencionó anteriormente para la aplicación en la que se basa el proyecto el movimiento del robot debe ser lento.

Con respecto al soporte para el producto a inspeccionar, se realizaron pruebas de colocación con una persona como operaria donde debía colocar 30 veces un producto de manera que quedara colocado de forma correcta y en el tope donde inicia el proceso de inspección. El criterio para asegurar que el producto estaba colocado de forma correcta es que quede dentro del campo de visión de la cámara al ubicarse en el punto donde inicia la medición. En la Figura 6.13 Se puede observar un ejemplo de los casos donde está bien colocado y donde no lo está.



a)



b)

*Figura 6.13 Colocación de la pieza: a) Correcto, b) Incorrecto. Elaboración propia*

En el Apéndice F en la Tabla A.5 se muestra las iteraciones realizadas de la colocación de la pieza en el soporte para su inspección. En la prueba de validación se observa que, de las 30 iteraciones, 29 fueron exitosas y solo 1 no lo fue. Por esta razón se considera que el porcentaje de éxito de la colocación de manera correcta en el soporte es del 96.66%.

### 6.3. Validación del sistema de visión y de movilización

Antes de presentar los resultados de las pruebas del sistema de visión y movilización se presenta la explicación de cómo se realiza la inspección de las dimensiones del producto junto con su código, tanto de la cámara como del Robot.

Iniciando por el sistema de visión, debido al campo de visión tan pequeño que se obtiene para poder observar la pieza con tal detalle que permita hacer las inspecciones se considera que debe de obtener imágenes en 5 diferentes puntos. En la Figura 6.14 se detallan los 5 puntos donde se deben capturar las imágenes.

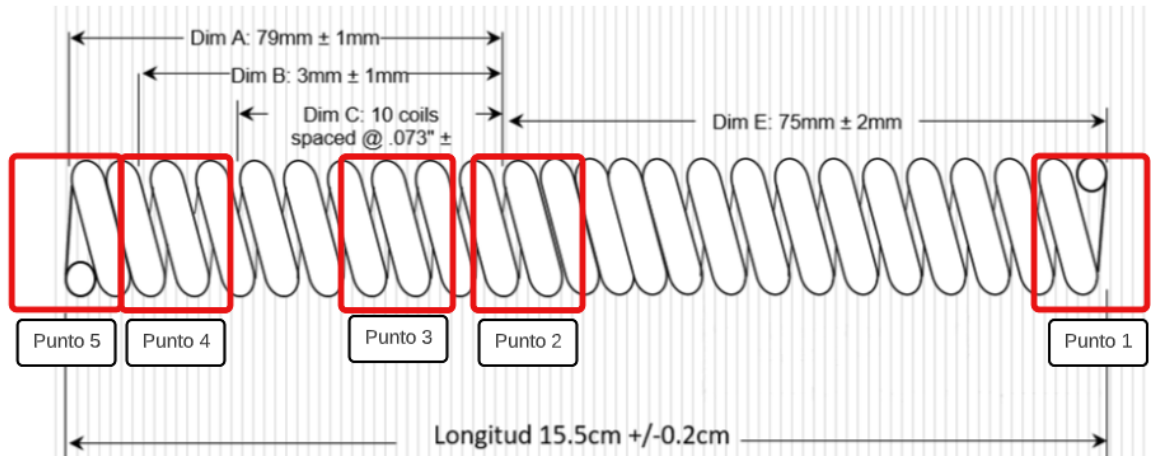


Figura 6.14 Puntos de captura de imagen. Elaboración propia

- El primer punto es el extremo derecho del producto para encontrar el lugar exacto donde inicia el producto y así obtener el primer lugar de medición.
- El segundo punto es el lugar donde inicia el segmento donde las vueltas tienen una separación más grande.
- El tercer punto es el lugar medio donde se puede hacer el conteo de las 10 vueltas y obtener la distancia entre la primera y la última vuelta.
- El cuarto punto es el sector donde finaliza el segmento con las vueltas que cuentan con una separación más grande entre ellas
- El quinto punto es el extremo izquierdo del producto donde se encuentra el lugar exacto donde termina el producto y así obtener el último lugar de medición.

Como se puede observar hay distancias dentro del producto que se recorre, pero no se toma ninguna captura, en este punto es donde entra a funcionar la comunicación con el robot. Cada vez que se toma una imagen el robot debe recorrer una distancia determinada para llegar al siguiente punto y capturar la siguiente imagen. Cada distancia recorrida por el Robot es enviada al final de recorrido de 1 producto, para realizar las sumas de la distancia y así obtener la dimensión de cada longitud del producto. A continuación, se muestra un ejemplo de capturas en cada uno de los puntos y sus resultados.

Antes que nada, se presenta un proceso de calibración, para poder tomar los resultados de las mediciones en pixeles y pasarlos a milímetros con la ayuda de una herramienta de calibración del *software* de la cámara. Este *software* se llama In-Sight Explorer y su forma de programación es por hoja de cálculo o "*Spreadsheet*", donde en cada celda o bloque se puede posicionar una herramienta diferente y obtener los datos desde la misma.

Al llevar el sistema de visión al primer punto se obtiene la imagen de la Figura 6.15, en la Figura 6.16 se observa las herramientas utilizadas para la obtención de un borde en el inicio del producto y calcular su distancia al centro de la imagen.

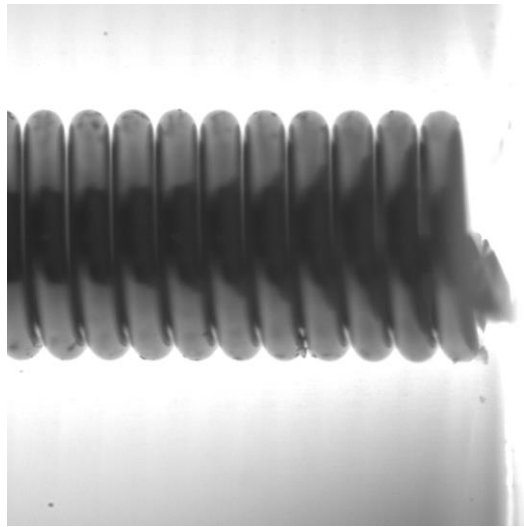


Figura 6.15 Imagen tomada en el punto 1. Elaboración propia

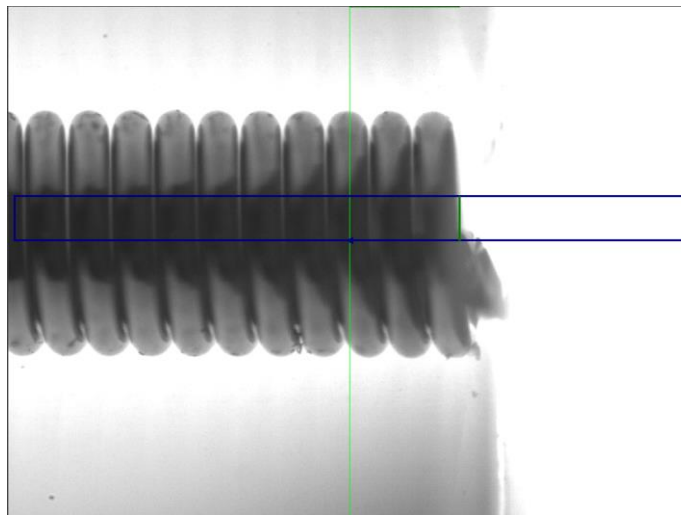
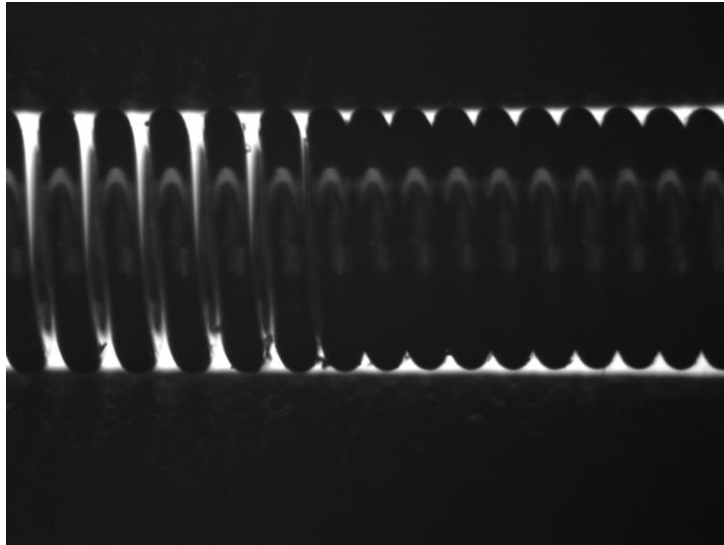
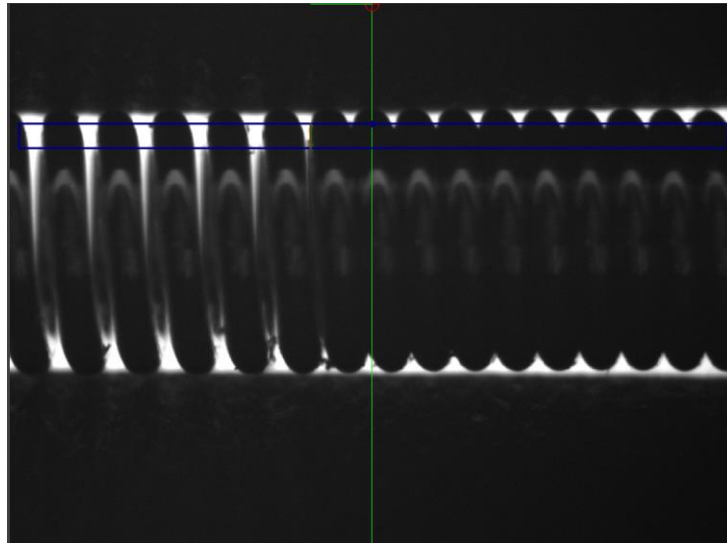


Figura 6.16 Imagen en el punto 1 con herramienta. Elaboración propia

En el segundo punto se obtiene la imagen de la Figura 6.17, y en la Figura 6.18 se muestra cuando encuentra la primer vuelta más espaciada, para realizar una medida similar a la del primer punto, la distancia entre la primera vuelta separada y el centro de la imagen.

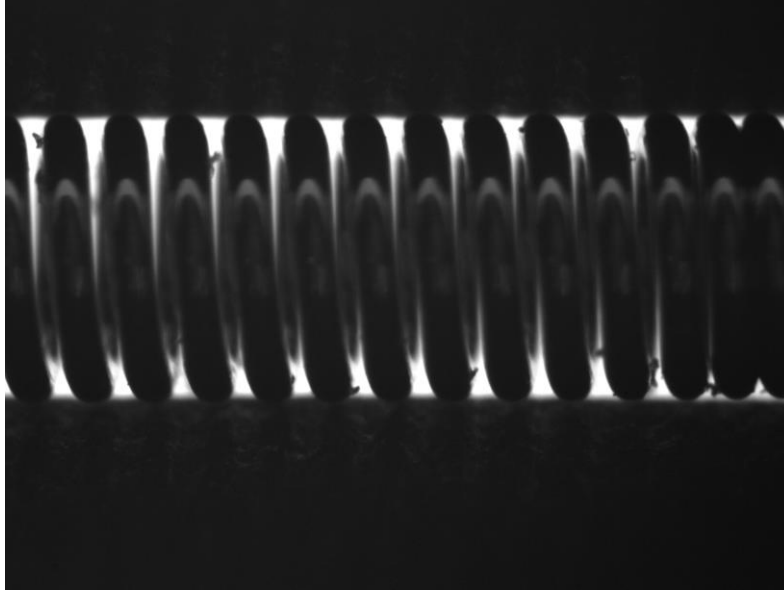


*Figura 6.17 Imagen tomada en el punto 2. Elaboración Propia*

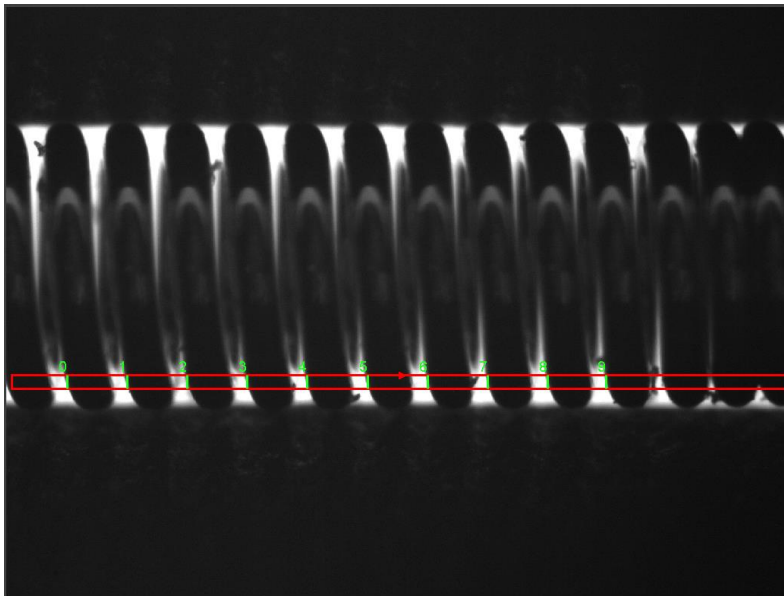


*Figura 6.18 Imagen con herramienta tomada en el punto 2. Elaboración propia*

En el tercer punto se toma una nueva imagen que se muestra en la Figura 6.19 y en la Figura 6.20 se muestra con herramienta. En este punto se cuentan 10 vueltas y se mide la distancia que hay entre la primera y la última.

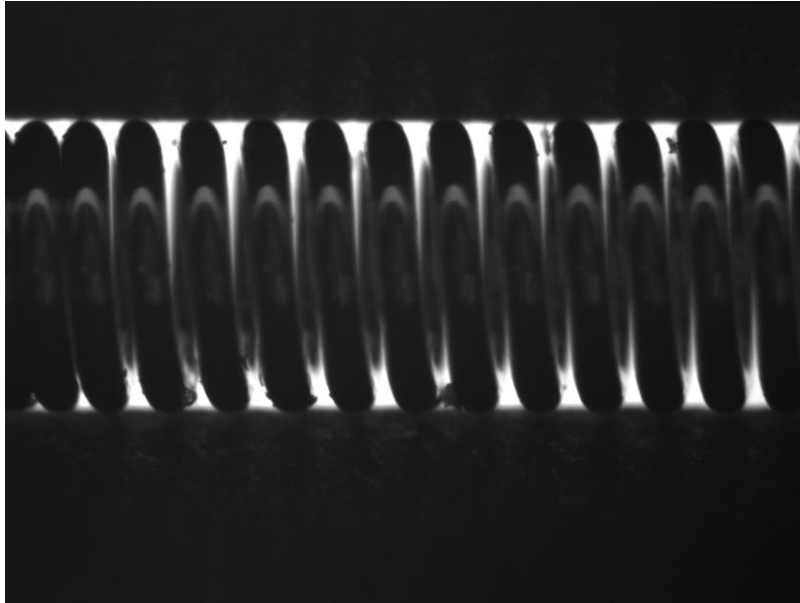


*Figura 6.19 Imagen obtenida en el punto 3. Elaboración propia*

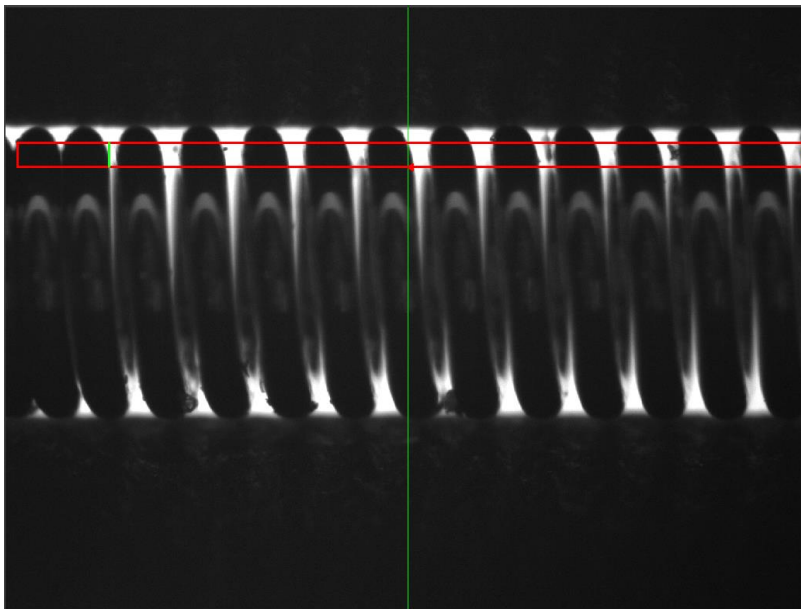


*Figura 6.20 Imagen con herramienta en el punto 3. Elaboración propia*

En el cuarto punto se toma la imagen de la Figura 6.21 y en la Figura 6.22 se muestra con la herramienta. En este caso se realiza el mismo procedimiento que en el punto 2 pero con la herramienta invertida para localizar la última vuelta separada.

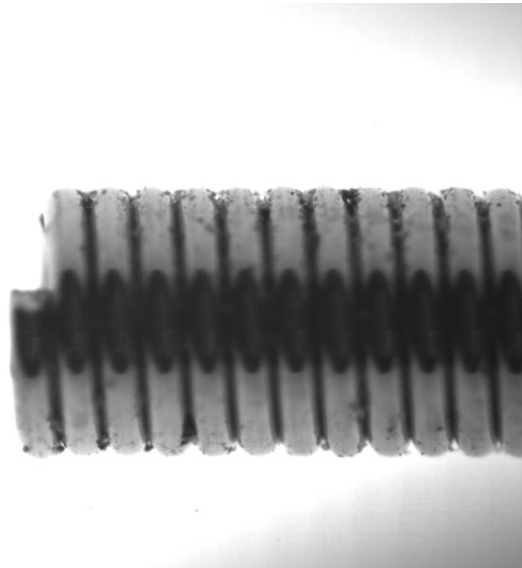


*Figura 6.21 Imagen obtenida en el punto 4. Elaboración propia*

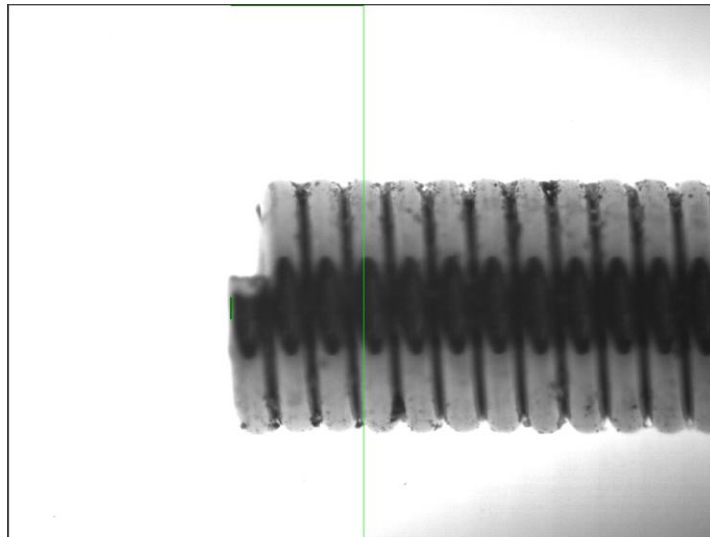


*Figura 6.22 Imagen con herramienta en el punto 4. Elaboración propia*

Finalmente, en el punto 5 se obtiene la imagen de la Figura 6.23 y en la Figura 6.24 se muestra la imagen obtenida con la herramienta, en esta caso la función es la misma que en el punto 1 pero con la diferencia que la herramienta esta invertida para encontrar el final de la pieza.



*Figura 6.23 Imagen obtenida en el punto 5. Elaboración propia*



*Figura 6.24 Imagen con herramienta en el punto 5. Elaboración propia*

Además, en la figura, se puede observar cómo se muestran los resultados al operario junto con su señal de pasa/falla por pieza. Cada resultado de las inspecciones se puede asociar a una salida digital de la cámara en caso de que se requiera mostrar los resultados de una manera diferente y no como se muestra en el HMI.



	Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4
Distancia A	78,872	79,220	79,136	78,538
Distancia B	3,537	3,836	3,548	3,134
Distancia C	1,866	1,682	1,901	1,879
Distancia E	75,568	74,781	75,050	76,167
Distancia Total	154,712	154,481	154,390	154,335
Pasa/Falla	●	●	●	●

Figura 6.25 Visualización en HMI de los resultados de la inspección. Elaboración propia

Dentro de la prueba para realizar la validación del sistema de visión y de movilización se colocó un solo producto dentro del soporte y se realizaron 30 mediciones del mismo producto, para corroborar la precisión y el porcentaje de error con respecto a la medida base que suministró el cliente cuando entrego las muestras de los productos. En este caso para la pieza evaluada se tienen las medidas de referencia que se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 6.1 Medidas de referencia de la pieza evaluada.

Dimensión	Valor (mm)
Distancia A	78,975
Distancia B	3,837
Distancia C	1,872
Distancia E	75,872
Distancia Total	154,846

Fuente: Cliente de Kopar

Los resultados de las 30 iteraciones se pueden observar en la sección Apéndice F en la Tabla A.6. Analizando los resultados de la Tabla 6.2 se confirma que el sistema de visión y de movilización es capaz de realizar las inspecciones y los movimientos más de un 90% de las veces, se confirma gracias a que el porcentaje de error para cada una de las dimensiones es muy pequeño.

Tabla 6.2 Porcentaje de error en la medición de la pieza en la prueba de repetitividad.

Dimensión	%Error mayor
Distancia A	0,004
Distancia B	0,052
Distancia C	0,160
Distancia E	0,005
Distancia Total	0,003

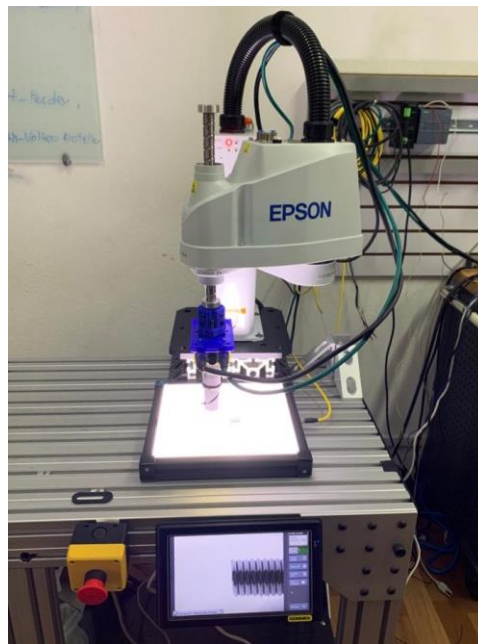
Fuente: Elaboración propia

Otro punto importante que se pudo corroborar con la obtención de los datos de las 30 iteraciones es la comunicación entre el sistema de visión y el sistema de movilización, y viceversa. La forma de comprobarlo es que para obtener las distancias totales se necesita que el robot envíe los datos de posicionamiento y distancia a la cámara para mostrar los resultados completos. Como en ninguno de los casos de las 30 iteraciones ha fallado el envío de datos se valida que se han enviado los datos más del 90% de las veces.

#### 6.4. Validación del sistema completo

Finalmente, para terminar el proceso de validación y análisis de resultados se evalúan las pruebas realizadas con el sistema completo, utilizando el sistema de visión con el robot como sistema de movilización y finalmente la inspección de 4 productos en el soporte de piezas. Es importante destacar que para las pruebas con el prototipo la estructura mecánica que se utilizó para colocar el robot y demás componentes es una mesa de pruebas con la que se cuenta en el laboratorio de Kopar, debido a que en el momento de realización de este proyecto no se contó con el presupuesto aprobado para la fabricación de la estación hasta el momento.

En la Figura 6.26 se observa el prototipo desarrollado para validar el sistema completo de inspección, además en la Figura 6.27 se muestra el soporte fabricado para colocar las piezas y en la Figura 6.28 se muestra detalladamente como se colocaron las piezas que se van a inspeccionar durante el proceso de validación. También se muestra en la Figura 6.29 el soporte y la placa diseñados para acoplar la cámara al último eje del robot como herramienta.



*Figura 6.26 Prototipo de la estación de inspección. Elaboración propia*



*Figura 6.27 Soporte para piezas a inspeccionar. Elaboración propia*



*Figura 6.28 Colocación de piezas en el soporte. Elaboración propia*



*Figura 6.29 Soporte para acople de cámara y robot. Elaboración propia*

Una vez colocado el equipo se procede a realizar las conexiones necesarias para poner el equipo en funcionamiento. Estos equipos al poder adquirirse en el mercado cuentan con conexiones rápidas o fáciles, cuentan con conectores donde nada más se debe enroscar el puerto o lo más complicado del caso es ingresar el cable en un conector y apretar un tornillo para sujetar el cable y realizar el contacto de conexión. Una vez colocadas las piezas en el soporte para ser inspeccionadas se procedió a realizar un proceso de inspección de 10 iteraciones sobre las piezas, en este caso se quiere corroborar que el sistema puede realizar inspecciones correctas al menos un 90% de las veces y además muy importante verificar que el tiempo de ciclo durante la inspección sea menor a 2 minutos.

En este caso en la Tabla 6.3 se muestran las medidas de referencia de las 4 piezas inspeccionadas, entre ellas hay 2 piezas buenas y 2 piezas malas.

Tabla 6.3 Valores de referencia de piezas evaluadas.

	Pieza 1 (BUENA)	Pieza 2 (MALA)	Pieza 3 (MALA)	Pieza 4 (BUENA)
Dimensión	Valor (mm)	Valor (mm)	Valor (mm)	Valor (mm)
Dim A	78,863	79,287	79,23	79,483
Dim B	3,547	3,893	3,598	3,901
Dim C	1,873	1,666	1,516	1,873
Dim E	75,537	74,735	75,000	75,263
Dim Total	154,750	154,506	154,379	154,441

Fuente: Elaboración propia

En las Tablas A.7, A.8, A.9 y A.10 se muestran los resultados obtenidos al realizar las 10 iteraciones de las inspecciones con el sistema completo. Como se puede observar en la Tabla 6.4 los porcentajes de error se mantienen bastante bajos por lo que se puede confirmar que el sistema es confiable a la hora de realizar las inspecciones, además de que al poder completarse las 10 iteraciones sin la pérdida de ningún dato o la variación muy grande de mediciones se concluye que se pudo obtener más del 90% de las mediciones correctas.

Tabla 6.4 Porcentajes de error de las piezas inspeccionadas.

	Pieza 1 (BUENA)	Pieza 2 (MALA)	Pieza 3 (MALA)	Pieza 4 (BUENA)
Dimensión	% ERROR mayor	% ERROR mayor	% ERROR mayor	% ERROR mayor
Dim A	0,006	0,016	0,015	0,011
Dim B	0,073	0,222	2,819	0,062
Dim C	0,814	0,514	1,547	0,135
Dim E	0,009	0,011	0,010	0,009
Dim Total	0,024	0,003	0,002	0,003

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de la Tabla 6.4 se puede observar que la pieza que tuvo un margen más alto de porcentaje de error es la pieza 3 en la dimensión B y en la Dimensión C, este resultado se puede dar por diferentes razones como la posición de la pieza, el acople de la cámara al eje del robot al ser una pieza impresa en 3D pudo haber quedado floja y tener un pequeño movimiento durante los recorridos de inspección causando que cuando la imagen se obtuviera las herramientas estuvieran colocadas donde se necesitaban. por último, otro factor que pudo afectar es que en el punto 3 donde se toma la imagen para realizar la medición de las vueltas separas se necesitó cubrir el borde del soporte con un material oscuro para que eliminara el efecto de que la luz envolvía por completo la pieza y por esta razón la herramienta tender a confundirse, al realizar este ajuste el contorno de la pieza se volvió más marcado y las herramientas funcionaron mucho mejor pero la manera de cubrir el soporte no quedo de la misma manera en todos los carriles, por lo que pudo afectar las mediciones en cierta manera.

Por último, se tomó el tiempo que duraba el sistema en inspeccionar una sola pieza y el tiempo que dura inspeccionando el set de 4 para tener como referencia el

tiempo de ciclo y compararlo con el tiempo de ciclo actual que maneja el cliente. En la Tabla 6.5 , se puede observar de las 10 iteraciones el tiempo de ciclo por pieza y por set. Adicionalmente en la figura A.16 se muestran como el programa del robot proyecto los resultados de los tiempos.

Tabla 6.5 Tiempos de ciclo de las 10 iteraciones.

	Pieza 1 (BUENA)	Pieza 2 (MALA)	Pieza 3 (MALA)	Pieza 4 (BUENA)	Set completo
Iteración	Tiempo de ciclo ( $\pm 0,001s$ )	Tiempo de ciclo ( $\pm 0,001s$ )	Tiempo de ciclo ( $\pm 0,001s$ )	Tiempo de ciclo ( $\pm 0,001s$ )	Tiempo de ciclo ( $\pm 0,001s$ )
1	13,722	13,731	13,733	13,725	57,955
2	13,726	13,731	13,733	13,727	57,961
3	13,722	13,731	13,733	13,725	57,954
4	13,722	13,733	13,734	13,725	57,957
5	13,721	13,732	13,735	13,725	57,956
6	13,724	13,731	13,736	13,727	57,962
7	13,721	13,731	13,733	13,250	57,954
8	13,722	13,731	13,734	13,728	57,959
9	13,722	13,733	13,733	13,727	57,959
10	13,722	13,732	13,736	13,725	57,962

Fuente: Elaboración propia

Comparando los resultados de la Tabla 6.5 que en promedio el tiempo de inspección por pieza es de 13.7s con el tiempo de ciclo de referencia del cliente de 2 minutos o 120 segundos por pieza, se tiene una mejoría de 88% menos de tiempo por pieza inspeccionada, por lo que se cumple la solución al problema principal de tener un tiempo de inspección por pieza menor a 2 minutos con el sistema automatizado.

Además, en la Figura 6.30, se puede visualizar la interfaz que el operario observa a la hora de realizar las inspecciones, donde el botón de “Activación” iniciaría el proceso de inspección y el de resultados finales muestra las medidas de cada pieza y su clasificación de Pasa/Falla, como se muestra en la Figura 6.31. Finalmente, en la Figura A.17 se muestra el documento que se crea a la hora de almacenar los datos.

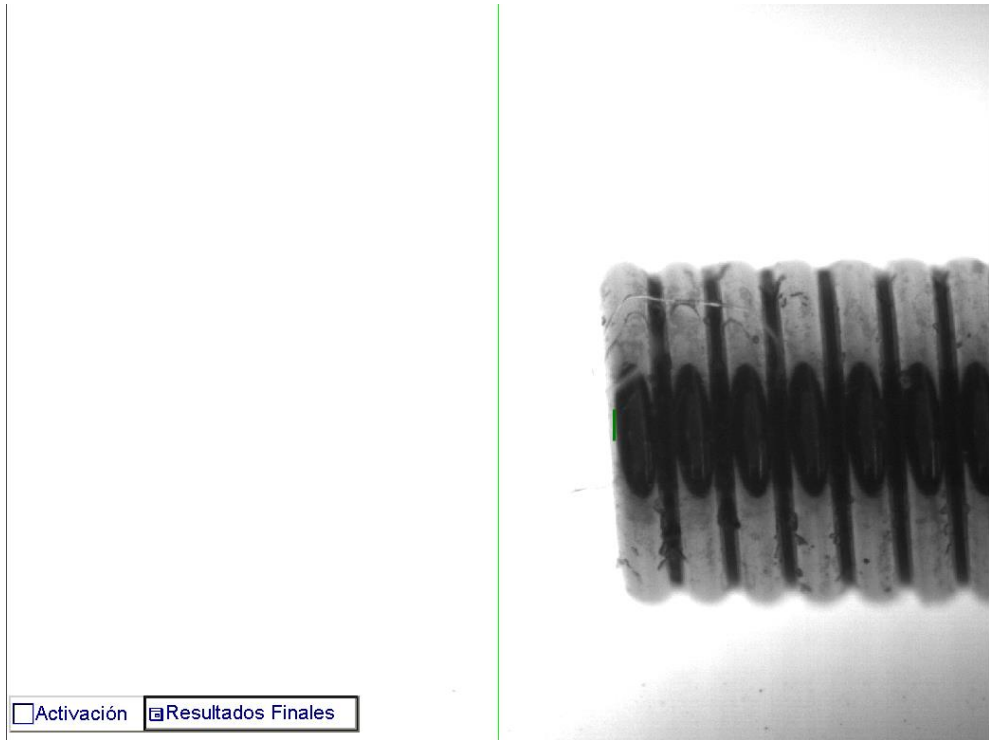


Figura 6.30 Interfaz Usuario Maquina. Elaboración propia

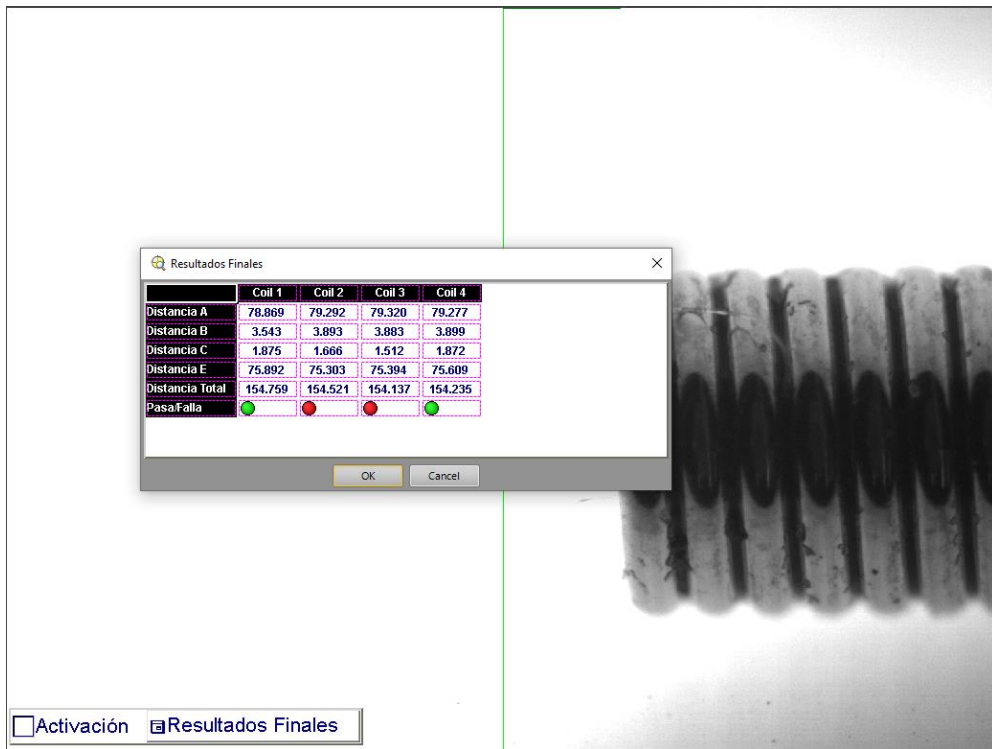


Figura 6.31 Visualización de resultados en interfaz Usuario Maquina. Elaboración propia

## 6.5. Indicadores de rentabilidad económica

De acuerdo con [49] la rentabilidad es la capacidad de una empresa de obtener un beneficio del capital invertido. Esta representa la relación entre los ingresos de una empresa y la cantidad de dinero que se ha recaudado por obtenerlos. Existen diferentes tipos de indicadores que permiten evaluar el rendimiento de una empresa o proyecto, estos logran determinar si el dinero invertido en una empresa está funcionando y en qué medida. Por lo cual, permite conocer la tasa interna de rentabilidad y el período de recuperación de la inversión. A continuación, se detallan 2 de esos índices de rentabilidad.

### 6.5.1. Indicadores de rentabilidad económica

Según [50], el valor presente neto o valor actual neto por sus siglas VAN, corresponde a un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer el valor de ganancia o pérdida de esa inversión, para ello toma todos los flujos de caja en una tasa específica, la cual representa el rendimiento mínimo que se debe ganar en un proyecto. El cálculo de este índice se realiza mediante el cálculo de la ecuación (6.1) en donde:

$FE_0$ : Inversión inicial de un proyecto.

$FE_t$ : Valor presente de los flujos de entrada de efectivo.

$k$ : *tasa equivalente al costo de capital.*

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1+k)^t} - FE_0$$

Ec. (6.1)

En el caso en el que el valor calculado del VAN sea mayor a uno se acepta el proyecto y en el caso de que el índice sea negativo se rechaza el proyecto.

### 6.5.2. Tasa interna de Rentabilidad (TIR)

El TIR es la rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. Este índice es utilizado en la evaluación de proyectos de inversión para comprobar la viabilidad de una inversión, ya que permite comparar inversiones entre ellas. Cuanto mayor sea la TIR mejor será la inversión del proyecto, en caso contrario este se rechaza. [50]. La expresión de la ecuación (6.2) permite realizar el cálculo de este índice, siendo los parámetros:

$$FE_0 = \sum_{t=1}^n \frac{FE_t}{(1 + TIR)^t}$$

Ec. (6.2)

### 6.6. Análisis Económico

De acuerdo con los indicadores económicos para la evaluación de la rentabilidad del proyecto, en la Tabla 6.6, se muestran los principales costos de los dispositivos que comprende el diseño de la Estación Automatizada de Inspección para la evaluación de gastos de inversión los cuales suplirá Kopar Costa Rica, inicialmente una vez se otorgue la realización del proyecto.

Dentro de los equipos que se utilizaron para la Estación Automatizada de Inspección se puede dividir en cuatro áreas:

- Robótica: Robot T3-B
- Sistema de visión: Cámara IS7802, iluminación, lente.
- Conectividad: Switch, fuente de alimentación, cables.
- Estructura mecánica: Perfiles de aluminio, soportes y accesorios varios.

Tabla 6.6 Gastos de inversión inicial de equipos del proyecto

Ítem	Costo total (\$)
Cable USB tipo A	10
Cable de Red	10
Micro-SD	10
Filamento PLA	35
Cable Alimentación Luz	100
Fuente de alimentación 24VDC	110
Cable Ethernet	150
Cable PWRIO	170
Accesorios Estructura	200
MICO Protección eléctrica	265
Switch	280
Soporte de piezas	300
Tornillería	300
Impresora 3D	600
Lente	787
Luz Backlight	1000
Vision View-HMI	1200
Perfiles de aluminio	1200
Computadora	1300
Cortinas de Seguridad	2500
Robot EPSON T3-B	8500
Sistema de Visión COGNEX	11400
<b>TOTAL</b>	<b>30427</b>

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.7, se incluyeron, además, el costo de gastos administrativos de Kopar Costa Rica durante el período de cuatro meses en qué consistió el desarrollo de este proyecto.

Tabla 6.7 Gastos de inversión administrativa inicial del proyecto.

Ítem	Costo total (\$)
Salario Pasante	1800
Energía Eléctrica	420
Internet	700
Agua	180
Alquiler	12000
Insumos de oficina	600
<b>TOTAL</b>	<b>15700</b>

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, en la Tabla 6.8 se muestra el resumen de inversión inicial del proyecto.

Tabla 6.8 Cuadro resumen de inversión del proyecto por parte de Kopar Costa Rica.

Ítem	Costo total (\$)
Inversión Administrativa	15700
Inversión de equipo	30427
<b>Total de inversión</b>	<b>46127</b>

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la rentabilidad, la empresa tiene que en sus proyectos la ganancia esperada sobre la inversión inicial del proyecto sea de un 30%, lo cual implica que, en la actualidad, el costo final de la estación automatizada de inspección tenga un valor de \$46 127.00 (USD).

De acuerdo con la forma de trabajar sus finanzas, Kopar cobra el monto total de la venta después de entregado el equipo y generalmente se trabaja con 30 días de crédito para cancelar el total de la venta.

En función de la información suministrada por Kopar, se espera obtener en ventas de servicios un promedio anual de \$38 000.00 (USD), además, se cuenta con el porcentaje de flujo neto efectivo que maneja la empresa a lo interno para determinar la rentabilidad de sus proyectos, el cuál debe ser de un 25%. Del mismo modo, como anteriormente se menciona el valor de la inversión inicial por parte de la empresa es el valor de adquisición de la estación, el cual sería de \$46 127.00 (USD). Por lo tanto, en una proyección de 6 años de beneficio, los valores de VAN y TIR son los mostrados en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Cálculo de flujos netos de efectivos para Kopar Costa Rica.

**EVALUACION DE PROYECTOS  
FLUJOS NETOS DE EFECTIVO (\$)**

<b>AÑOS</b>	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 6</b>
<b>INVERSION INICIAL</b>							
Equipamiento	46 127,00						
Total Inversion Inicial	46 127,00						
<b>BENEFICIOS</b>							
Venta Servicios		38 000,00	38 000,00	38 000,00	38 000,00	38 000,00	38 000,00
<b>GASTOS VARIABLES INCREM</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>							
Estación Automatizada de Inspección		6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00
Total de gastos		6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00
<b>UTILIDAD ANTES DE IMP.</b>		31 250,00	31 250,00	31 250,00	31 250,00	31 250,00	31 250,00
<b>IMPUESTO DE RENTA</b>		9 375,00	9 375,00	9 375,00	9 375,00	9 375,00	9 375,00
<b>UTILIDAD DES/IMPUES.</b>		21 875,00	21 875,00	21 875,00	21 875,00	21 875,00	21 875,00
<b>DEPRECIACION INCREM.</b>							
Estación Automatizada de Inspección		6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00	6 750,00
<b>VALORES DE RESCATE</b>							
Activos Fijos CMF							15 000,00
Impacto en Renta							-4 500,00
<b>FLUJO NETO EFECTIVO</b>	<b>-46 127,00</b>	<b>28 625,00</b>	<b>28 625,00</b>	<b>28 625,00</b>	<b>28 625,00</b>	<b>28 625,00</b>	<b>39 125,00</b>
FNE descontados (25%)	<i>\$87 237,02</i>						
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	<i>\$41 110,02</i>						
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	<i>59,054%</i>						
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	<i>1,89</i>						

Fuente: Elaboración propia

Si bien la inversión de la estación de inspección no brinda ganancia en sí para Kopar, esta permite que las ventas de las estaciones de inspección de cables y embobinados aumenten, por lo que la recuperación de la inversión es recuperable en el primer año. De acuerdo al valor calculado del índice VAN este es mayor a 0 y el índice TIR es mayor a la inversión inicial del proyecto, por lo que se considera la inversión como aceptable.

### 6.7. Conclusiones de la etapa de validación.

Como resumen, utilizando los resultados obtenidos con las pruebas de validación realizadas junto con el proceso de diseño de ingeniería, en la Tabla 6.10

se pueden encontrar los resultados comparados con las necesidades de la Sección 3, específicamente de la Tabla 3.1 y en que sección se encuentra el resultado de la necesidad.

Tabla 6.10 Necesidades y confirmación de su cumplimiento.

Número	Necesidad	Sección de documento donde se encuentra
1	La inspección a realizar debe cumplir con las especificaciones del plano.	Se logró realizar la inspección completa. Validado en la sección 6.3 junto con la Tabla A.6
2	El sistema debe ser capaz de inspeccionar productos de diámetro entre 0.5mm y 1mm.	Se logró con las piezas que tienen un diámetro de 0.87mm. Validado en la sección 6.3
3	El sistema debe inspeccionar la longitud del producto.	Validado en la sección 6.3
4	El sistema debe ser automatizado.	Validado en la sección 6.4
5	El proceso de inspección completo por pieza debe ser menor a 2 minutos.	Validado en la sección 6.4
6	Los componentes deben ser de fácil conexión.	Validado en la sección 5.5 con la escogencia de dispositivos.
7	Se debe contar con un interfaz usuario – máquina para visualización de la inspección.	Validado en la sección 5.5
8	El sistema debe contar con salidas digitales para el Pasa/Falla de la inspección.	Validado en la selección del sistema de visión, Ver sección 5.5 y 6.3
9	Se debe contar con un sistema de sujeción o base para colocar el producto lo más parecido en todas las inspecciones.	Ver sección 6.2 junto con la sección 5.5.
10	El sistema debe ser capaz de almacenar los datos	Validado al seleccionar un sistema de visión de Cognex. Ver sección 5.5

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones más relevantes generadas durante el desarrollo de este proyecto, a partir de los resultados obtenidos relacionados a cada uno de los objetivos planteados.

#### **Conclusión del objetivo general**

- Se generó un prototipo funcional de la estación automatizada de inspección de cables y embobinados para Kopar.

#### **Conclusiones del objetivo específico 1.**

- Se logró recopilar la información necesaria para el desarrollo del proyecto en todas las etapas de diseño a través de visitas y comunicación durante todo el proceso, lo que ayudo al estudio del proceso de inspección actual.
- Se estudió el sistema de inspección actual de la empresa en la que se basó la estación automatizada de inspección de la cual se obtuvieron las necesidades y requerimientos del proyecto y se solucionó la problemática principal que es el tiempo de inspección del embobinado.

#### **Conclusión del objetivo específico 2.**

- Se diseñó una estructura mecánica para el sistema de inspección en el cual se validó que es lo suficientemente robusta para soportar las diferentes cargas y movimientos que realiza el robot a máximas velocidades al obtener un factor de seguridad mayor a 1 en la pieza más crítica del ensamble de 2.6, destacando que para esta aplicación el robot no necesita estar a su máxima velocidad.

- El soporte para las piezas a inspeccionar se diseñó y se fabricó, el cual validó su funcionamiento al obtener un 96.66% de éxito en la colocación correcta de las piezas.

### **Conclusiones del objetivo específico 3.**

- Se logró implementar el sistema de visión capaz de realizar las inspecciones cumpliendo con las especificaciones planeadas y respecto a las mediciones propuestas en el plano de la pieza.
- El sistema de movilización se logró implementar cumpliendo con los desplazamientos que debía realizar para poder completar la inspección completa de las piezas.

### **Conclusiones del objetivo específico 4.**

- Se logró realizar una comunicación exitosa entre el sistema de movilización y el sistema de visión, pues constantemente el robot envía datos de posición y distancia hacia la cámara y también cuando realizar las capturas de imagen.
- Puesto que nunca hubo pérdida de información en su envío se concluye que se logró obtener una comunicación del 100% en todos los casos.

### **Conclusiones del objetivo específico 5.**

- Se logró validar la funcionalidad del prototipo implementado al obtener inspecciones en tiempos de ciclo de 13.7s en promedio, mucho menor a 2 minutos por pieza.
- Además de obtener resultados fiables en la inspección de las piezas y con un porcentaje de éxito mayor al 90% de las inspecciones.

## 7.2. Recomendaciones

- Se recomienda a Kopar contar con diferentes soportes para las piezas de los embobinados porque dependiendo de la inspección que se desee realizar se debe variar la forma de iluminación de la pieza.
- El soporte fabricado para este proyecto debe de considerarse la reducción de su altura para mejorar la iluminación y el resaltado del contorno de las piezas.
- Considerar cuando se realice la fabricación de la estructura mecánica, implementar una puerta por la parte de atrás del sistema para realizar mantenimientos necesarios dentro del equipo.

## Referencias Bibliográficas

- [1] "Kopar" *Kopar.com.mx*, 2022. [Online]. Available: <https://kopar.com.mx/es>. [Accessed: Jul. 30, 2022]
- [2] *Conceptos y métodos en visión por computador*. Available: <file:///D:/Bibliografias/ConceptosyMetodosenVxC.pdf>.
- [3] "What are Vision Sensors? | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/blogs/machine-vision/what-are-vision-sensors#:~:text=Vision%20sensors%2C%20not%20to%20be,fail%20inspections%20in%20unstructured%20situations>. [Accessed: Ago. 28, 2022]
- [4] Cognex, "In-Sight 2000 Vision Sensors | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-sensors/in-sight-2000-vision-sensors..> [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [5] CÉSAR EDUARDO MONTALVO ARENAS, "OPTICA," Ago, 2010.
- [6] Fotonostra, "Lentes de objetivos fotográficos," *Fotonostra.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.fotonostra.com/fotografia/lentesobjetivo.htm>. [Accessed: Ago. 31, 2022]
- [7] Alfonso Domínguez Lavín, "La distancia focal de un objetivo: todo lo que debes saber," *Foto24*, Jun. 26, 2015. [Online]. Available: <https://blog.foto24.com/distancia-focal-objetivo/>. [Accessed: Ago. 31, 2022]
- [8] Bimba, "We make things MOVE ® Electric Actuators and Linear Robots Catalog" [Online]. Available: [https://djq0xq3q4j4b.cloudfront.net/pdf/Electric\\_Actuators\\_Linear\\_Robots.pdf#page=193](https://djq0xq3q4j4b.cloudfront.net/pdf/Electric_Actuators_Linear_Robots.pdf#page=193). [Accessed: Oct. 19, 2022]
- [9] Igentics Ltd - <http://www.igentics.com>, "Extruded ISO 15552 - Extruded ISO 15552 - Norgren," *Bimba.com*, 2022. [Online]. Available: [https://www.bimba.com/en/detail/extruded\\_iso\\_15552..](https://www.bimba.com/en/detail/extruded_iso_15552..) [Accessed: Oct. 19, 2022]

- [10] Igentics Ltd - <http://www.igentics.com>, "Mitsubishi HG-KR Series Servo Motors - HG-KR Servo - Norgren," *Bimba.com*, 2022. [Online]. Available: [https://www.bimba.com/en/detail/hg\\_kr\\_servo..](https://www.bimba.com/en/detail/hg_kr_servo..) [Accessed: Oct. 19, 2022]
- [11] Oxford, "robot," *Oxford Reference*, 2022. [Online]. Available: [https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100425123#:~:text=\(especialmente%20in%20science%20fiction\)%20a,human%20movements%20and%20functions%20automatically..](https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100425123#:~:text=(especialmente%20in%20science%20fiction)%20a,human%20movements%20and%20functions%20automatically..) [Accessed: Ago. 29, 2022]
- [12] Epson Robots, "Industrial Robots | Factory Automation | Epson US," *Epson.com*, 2022. [Online]. Available: <https://epson.com/industrial-robots-factory-automation>. [Accessed: Ago. 29, 2022]
- [13] Giovanni Pardo Chamorro and Heiner Toro, "Protocolos de comunicación industrial," Bogotá DC, 2017.
- [14] Advantech, "Advantech," *Advantech.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.advantech.com/en>. [Accessed: Oct. 25, 2022]
- [15] Karl T Ulrich and Steven D Eppinger, *Diseño Y Desarrollo De Productos*. (5ta ed.) Mexico: Mc Graw Hill Education, 2019.
- [16] E. E. Gutiérrez Espeleta, "Plan Nacional de Energía," 2015 [Online]. Available: <https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf>. [Accessed: Oct. 10, 2022]
- [17] Universidad Internacional de Valencia, "Diferencias entre señal analógica y digital," *VIU*, Mar. 21, 2018. [Online]. Available: <https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/diferencias-entre-senal-analogica-y-digital>. [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [18] SEIKA, "5 Lenguajes de Programación para PLC | SEIKA Automation," *SEIKA Automation | Automatización Industrial*, Aug. 03, 2019. [Online]. Available: <https://www.seika.com.mx/5-lenguajes-de-programacion-para-plc/>. [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [19] "Encoders Absolutos y Incrementais | Blog da Dynapar Encoders - Encoders Absolutos y Incrementais | Blog da Dynapar Encoders," *Encoders Absolutos y*

*Incrementais | Blog da Dynapar Encoders*, 2020. [Online]. Available: <https://www.dynaparencoders.com.br/blog/es/>. [Accessed: Oct. 25, 2022]

[20] Cognex, "In-Sight 7000 Series Vision Systems | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-7000-series>. [Accessed: Oct. 2, 2022]

[21] Iñigo Gútiérrez, "El camino hacia OPC UA - PROGRAMACIÓN SIEMENS," *PROGRAMACIÓN SIEMENS*, May 15, 2019. [Online]. Available: <https://programacionsiemens.com/el-camino-hacia-opc-ua/>. [Accessed: Oct. 18, 2022]

[22] Profinet University, "¿Qué es PROFINET? - Universidad PROFINET," *Universidad PROFINET*, Apr. 16, 2019. [Online]. Available: <https://profinetuniversity.com/profinet-basico/que-es-profinet/>. [Accessed: Oct. 18, 2022]

[23] Mitsubitshi, "PLC - CC Link," *PLC - CC Link*, 2014. [Online]. Available: [mitsubishielectric.com/fa/assist/e-learning/pdf/spa/1-CC-Link\\_fod\\_spa.pdf](http://mitsubishielectric.com/fa/assist/e-learning/pdf/spa/1-CC-Link_fod_spa.pdf). [Accessed: Ago. 31, 2022]

[24] Satoshi, "Redes Modbus: Cuatro puntos que no debes olvidar," *Opiron*, Jul. 13, 2017. [Online]. Available: <https://www.opiron.com/redes-modbus/>. [Accessed: Oct. 25, 2022]

[25] Cognex, "IN-SIGHT 2000 SERIES VISION SENSORS," 2019.

[26] Cognex, "In-Sight 2800 Vision System | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-2800..> [Accessed: Oct. 2, 2022]

[27] Cognex, "Sistemas de visión artificial 2D | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/es-mx/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems..> [Accessed: Oct. 2, 2022]

[28] Cognex, "SISTEMA DE VISIÓN IN-SIGHT SERIE 7000," Jul. 2021.

- [29] Cognex, "In-Sight 8000 Vision Systems | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-8000-series>. [Accessed: Nov. 25, 2022]
- [30] Cognex, "In-Sight 9000 Vision Series | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-9000-series..> [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [31] Cognex, "In-Sight D900 - Deep Learning Vision System | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/2d-machine-vision-systems/in-sight-d900..> [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [32] Cognex, "In-Sight 3D-L4000 | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/3d-machine-vision-systems/in-sight-3d-l4000..> [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [33] PHD Inc, "SCV," *Phdinc.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.phdinc.com/product/?product=linear-slides&series=scv>. [Accessed: Oct. 6, 2022]
- [34] PHD Inc, "SKSL," *Phdinc.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.phdinc.com/product/?product=linear-slides&series=sksl>. [Accessed: Oct. 6, 2022]
- [35] Igentic Ltd - <http://www.igentic.com>, "ST Series ST80 Belt Driven Actuators - ST80 - Norgren," *Bimba.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.bimba.com/en/detail/st80..> [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [36] Igentic Ltd - <http://www.igentic.com>, "IntelliAxis® H-Bot - H-Bot - Norgren," *Bimba.com*, 2022. [Online]. Available: [https://www.bimba.com/en/detail/h\\_bot..](https://www.bimba.com/en/detail/h_bot..) [Accessed: Oct. 2, 2022]
- [37] Universal Robots, "Brazo Robótico UR3e | Universal Robots," *Universal-robots.com*, 2015. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/es/productos/robot-ur3/>. [Accessed: Oct. 6, 2022]
- [38] Swiss Info, "Costa Rica alcanza en 2021 el 99,98 % de generación eléctrica renovable," *SWI swissinfo.ch*, Dec. 16, 2021. [Online]. Available: [https://www.swissinfo.ch/spa/costa-rica-energ%C3%ADa\\_costa-rica-alcanza-en-](https://www.swissinfo.ch/spa/costa-rica-energ%C3%ADa_costa-rica-alcanza-en-)

2021-el-99-98---de-generaci%C3%B3n-el%C3%A9ctrica-renovable/47199372.

[Accessed: Sep. 8, 2022]

[39] Opto Engineering, "LT2BC048216-W | LED illuminators | Opto Engineering | Lighting," *Opto Engineering*, 2022. [Online]. Available: <https://www.opto-e.com/en/products/lt2bc-series/LT2BC048216-W>. [Accessed: Nov. 25, 2022]

[40] Epson, "ROBOT SPECIFICATIONS 2023 CATALOG," May 2021 [Online]. Available:

[https://mediaserver.goepson.com/ImConvServlet/imconv/a333bad9c7d6ef1ec45a44d2acc2aba6bc9330bc/original?assetDescr=Robots\\_Specifications\\_2023\\_Catalog\\_CPD-54833R3.pdf..](https://mediaserver.goepson.com/ImConvServlet/imconv/a333bad9c7d6ef1ec45a44d2acc2aba6bc9330bc/original?assetDescr=Robots_Specifications_2023_Catalog_CPD-54833R3.pdf..) [Accessed: Oct. 22, 2022]

[41] Murr Elektronik, "Murrelektronik GmbH," *Murrelektronik.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.murrelektronik.com/products-industries/products/summary/>. [Accessed: Oct. 25, 2022]

[42] Murr Elektronik, "MICO electronic circuit protection, 4 CHANNELS," *Murrelektronik.co.uk*, 2022. [Online]. Available: <https://shop.murrelektronik.co.uk/en/Electronics-in-the-Control-Cabinet/Intelligent-Power-Distribution/Modules/MICO-electronic-circuit-protection-4-CHANNELS-9000-41034-0100400.html?listtype=search&searchparam=MICO%20&src=search&srchPage=1&perPage=10&pos=3..> [Accessed: Oct. 25, 2022]

[43] Cognex, "Lens Advisor - Interactive Tools | Cognex," *Cognex.com*, 2022. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/resources/interactive-tools/lens-advisor..> [Accessed: Oct. 26, 2022]

[44] Opto Engineering, "MC3-03X | Macro & Fixed focal length lenses | Opto Engineering | Optics," *Opto Engineering*, 2022. [Online]. Available: <https://www.opto-e.com/en/products/mc03-03x-serie/MC3-03X>. [Accessed: Oct. 26, 2022]

[45] Ferreteria Florencia, "Ventajas y usos de los perfiles de aluminio," *Ferreteriaflorencia.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.ferreteriaflorencia.com/ventajas-de-los-perfiles-de->



ySWQ9cDU5NTY4NSZmZI90aXRszT1DNEMtUEEwNDUxMEEwMDAwMCZmZI9x  
dWVyeT0mZmZfcG9zPTImZmZfb3JpZ1Bvcz01OSZmZI9wYWdlPTEmZmZfcGFnZ  
VNpemU9OCZmZI9vcmlnUGFnZVNpemU9OCZmZI9zaW1pPTkyLjA=.

[Accessed: Oct. 31, 2022]

## Apéndices y Anexos

### Apéndice A

En la figura A.1 se muestra el plano contra el que se deben realizar las inspecciones de las piezas.

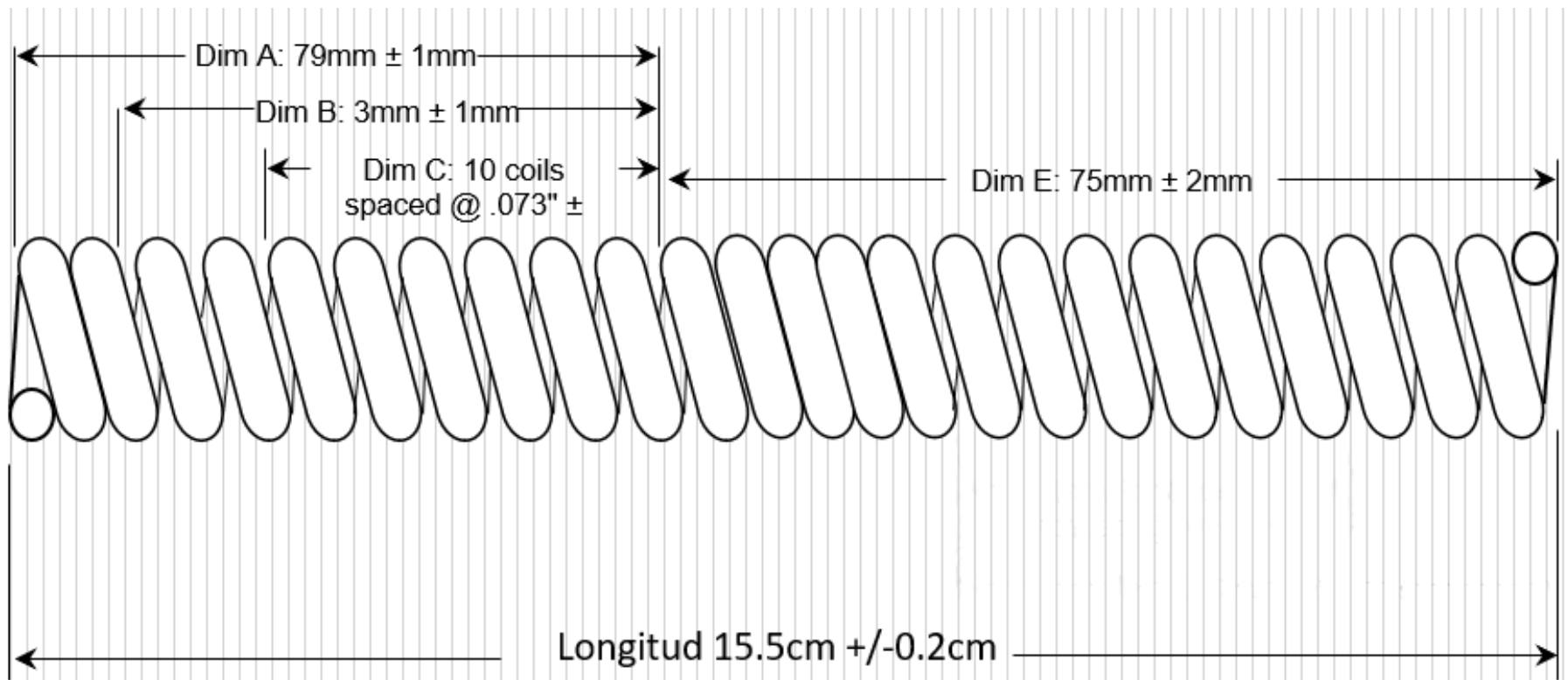


Figura A.1 Plano con las medidas a inspeccionar de la pieza. Cliente Kopar

## Apéndice B

En el apéndice B se muestran diferentes figuras con cuadros comparativos o de especificaciones de los sistemas de visión que se evaluaron en la sección 5.2.2.

<b>IN-SIGHT 2000 MODELS</b>		<b>2000-110</b>	<b>2000-120</b>	<b>2000-130</b>	<b>2000-230</b>	<b>2001-230</b>
User Interface		In-Sight Explorer EasyBuilder, Cognex VisionView PC Software, and VisionView 900 HMI touchscreen panel				
1/3" CMOS Imager, Global Shutter		Monochrome and Color				
S-Mount/M12 Lenses		Standard: Autofocus (liquid lens) 6.2 mm or manual focus 8 mm Optional: Manual focus 3.6 mm, 6 mm, 12 mm, 16 mm, 25 mm				
Image Modes	640 x 480 (standard)	✓	✓	✓	✓	✓
	640 x 480 (2x magnification)	✗	✓	✓	✓	✓
	800 x 600 (2x magnification)	✗	✗	✓	✓	✓
	1280 x 960 <sup>1</sup>	✗	✗	✗	✗	✓
Lighting	Standard	Diffuse white LED ring light				
	Options	Red, blue and IR LED ring lights and lens filters, and polarized light cover				
Maximum Acquisition Speed <sup>2</sup>		40 fps	75 fps (mono) 55 fps (color)			40 fps (mono) 24 fps (color)
Relative Processing Speed		1x	2x			
Location Tools	Pattern	✓	✓	✓	✓	✓
	Edge, Circle	✗	✗	✓	✓	✓
Inspection Tools	Pattern	✓	✓	✓	✓	✓
	Pixel Count	✗	Grayscale and color			
	Brightness & Contrast	✗	✓	✓	✓	✓
Measurement & Counting Tools	Edges	✗	✗	✓	✓	✓
	Distance, Angle & Diameter	✗	✗	✓	✓	✓
	Patterns & Edges	✗	✗	✓	✓	✓
Advanced Features	OCR	✗	✗	✗	✓	✓
	Blob Detection	✗	✗	✗	✓	✓
	Image Filters	✗	✗	✗	✓	✓

Figura A.2 Tabla de comparación de características de IS2000. [4]

<b>IN-SIGHT 2800 SPECIFICATIONS</b>	
Image Sensor	1 /2.8" CMOS monochrome and color
Image Sensor Properties	6.17 mm diagonal, 2.8 µm square pixels
Image Resolution Options	SVGA <sup>1</sup> (720x540), 1.6 MP (1440x1080)
Electronic Shutter Speed	Min. exposure: 29 µs Max. exposure: Up to 10 ms (internal illumination) / Up to 200 ms (external illumination)
Acquisition	Up to 45 Hz
Lens Options	Multi Torch: 8 mm, 12 mm, 16 mm (High Speed Liquid Lens or manual focus lens) Mini: 6.2 mm or 16 mm High Speed Liquid Lens
Discrete Inputs	2 opto-isolated
Discrete Outputs	2 opto-isolated
Other I/O Points	2 user configurable as inputs or outputs
Status Outputs	5 status LEDs, audible beeper
Lighting	Multi Torch: High-Powered Multi-Color 4 LED ring light (red, green, blue, white) Mini: 4 LED small form factor light for 6.2mm lens (red, blue, white, IR options) Mini HPIL: 4 LED small form factor high-powered light for 16 mm lens (red, white options)
Communications	Ethernet interface
Protocols	TCP/IP, PROFINET, EtherNet/IP™, SLMP, OPC/UA, FTP
Power	24V +/- 10%
Power Consumption	≤7.5W
Materials	ABS, acrylic, aluminum alloy, NBR, PC, PET, PMMA, silicone, silicone rubber, stainless steel, TVP, zinc alloy
Weight	6.2 mm: 141 g; 16 mm: 169 g; Multi Torch: 290 g; Right angle configuration adds 50 g
Operating Temperature	0–40 °C (32–104 °F)
Storage Temperature	-10–60 °C (14–140 °F)
Operating and Storage Humidity	<95% non-condensing
Protection	IP67
RoHS Certified	Yes
Approvals	EU CE, US FCC, TUV CB NRTL IEC 61010
Software	<a href="#">In-Sight Vision Suite</a>

Figura A.3 Tabla de especificaciones de IS2800. [26]

Cognex's comprehensive line of sensors and 2D and 3D systems all use machine vision technology to perform inspections but are engineered for different tasks.



**Vision Sensors**



**2D Vision**



**3D Vision**









	Vision Sensors	2D Vision	3D Vision
 Presence/Absence	✓	✓	✓
 Defect Detection	✓	✓	✓
 Assembly Verification	✓	✓	✓
 Gauge/Measure	✓	✓	✓
 Cosmetic Inspection		✓	✓
 Guide/Align		✓	✓
 OCR/OCV	✓	✓	
 Code Reading		✓	

Figura A.4 Tabla comparativa de herramientas disponibles en los sistemas de visión. [46]

A continuación, se muestran en la figura A.5 y A.6 unos cuadros comparativos sobre las especificaciones de las diferentes series de sensores y sistemas de visión en 2D de la marca Cognex





	2000 Series	2800 Series	7000 Series	8000 Series	9000 Series	D900 Series
 Image						
Imager Type	Monochrome/Color Area Scan	Monochrome/Color Area Scan	Monochrome/Color Area Scan	Monochrome/Color Area Scan	Monochrome/Color Area Scan, Monochrome line scan	Monochrome/Color Area Scan
Resolution	Up to 1.2MP (1280 x 960)	Up to 1.6 MP (1440 x 1080)	Up to 5MP (2448 x 2048)	Up to 5MP (2448 x 2048)	12MP (4096 x 3000), 32MP (2048 x up to 16,384 lines) for line scan	Up to 5MP (2592 x 1944)
Acquisition Speed (Max)	75 fps	Up to 45Hz	Up to 217 fps	Up to 217 fps	Up to 14 fps, 66K lines per second for line scan	Up to 51 fps
 Options						
Lenses	S-Mount, Autofocus	S-Mount, Autofocus	C-Mount, S-Mount, Autofocus	C-Mount	C-Mount	C-Mount, S-Mount, Autofocus
Lighting	Integrated	Integrated	Integrated, External light via light control connector	N/A	External light via light control connector (area scan only)	Integrated, External lights via light control connector
 Networking						
Speed	Gigabit Ethernet (10/100/1000 Mbps)					
General Protocols	TCP/IP, UDP, FTP, Telnet, RS-232C	TCP/IP, FTP	TCP/IP, UDP, FTP, SFTP, Telnet, SMTP			TCP/IP, FTP
Industrial Protocols	OPC UA, EtherNet/IP with AOP, PROFINET Class B, iQSS, Modbus TCP, SLMP/SLMP Scanner, CC-Link IE Field Basic	PROFINET, EtherNet/IP, SLMP, OPC/UA	OPC UA, EtherNet/IP with AOP, PROFINET Class B, iQSS, Modbus TCP, SLMP/SLMP Scanner, CC-Link IE Field Basic, IEEE 1588 (CIP Sync)	OPC UA, EtherNet/IP with AOP, PROFINET Class B, iQSS, Modbus TCP, SLMP/SLMP Scanner, CC-Link IE Field Basic	OPC UA, EtherNet/IP with AOP, PROFINET Class B, iQSS, Modbus TCP, SLMP/SLMP Scanner, CC-Link IE Field Basic, IEEE 1588 (CIP Sync)	Ethernet/IP with AOP, Profinet Class A, Profinet Class B
 I/O						
Trigger input	1	1	1	1	1	1
General purpose input	1	1	1		1	1
General purpose output	4	2	2	2	2	2
Bi-Directional		2	2		2 (area scan only)	2
Encoder					2 (line scan only)	
Expansion I/O	CIO-1400		CIO-1400, CIO-Micro	CIO-Micro	CIO-1400, CIO-Micro	
Serial	RS-232C					

Figura A.5 Cuadro comparativo A de especificaciones de sistemas de visión 2D Cognex. [51]

	2000 Series	2800 Series	7000 Series	8000 Series	9000 Series	D900 Series
<b>Mechanical</b>						
Length	In-line: 92 mm (3.61 in), Right-angle: 61 mm (2.42 in)	In-line: Up to 110 mm (4.3 in), Right-angle: Up to 68 mm (2.7 in)	90.1 mm (3.54 in)	75.5 mm (2.97 in)	121.0 mm (4.77 in)	121.0 mm (4.77 in)
Width	60 mm (2.38 in)	Up to 69 mm (2.7 in)	60.5 mm (2.38 in)	35 mm (1.38 in)	60.5 mm (2.38 in)	60.5 mm (2.38 in)
Depth	52 mm (2.05 in)	Up to 104 mm (4.1 in)	Up to 2MP: 35.7 mm (1.41 in), 5MP: 49.4 mm (1.94 in)	32 mm (1.26 in)	53.4 mm (2.10 in)	53.4 mm (2.10 in)
Protection	IP65	IP67	IP67	IP40	IP67	IP67
<b>Vision Tools</b>						
Cognex AI		✓				✓
Pattern Matching	✓	✓	✓ Available PatMax and PatMax RedLine			
Blob	✓		✓	✓	✓	✓
Edge	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Measurement	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1D/2D Code Reading			✓ IDMax®, PowerGrid®, Hotbars®	✓ IDMax, PowerGrid, Hotbars	✓ IDMax, PowerGrid, Hotbars	✓ IDMax
OCR	✓		✓	✓	✓	✓
Flaw Detection			✓	✓	✓	✓
Color Verification	✓		✓	✓	✓	✓
Color Identification			✓	✓	✓	✓
Histogram			✓	✓	✓	✓
Brightness	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pixel Counting	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Contrast	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Image Filters	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figura A.6 Cuadro comparativo B de especificaciones de sistemas de visión 2D Cognex. [51]

## ESPECIFICACIONES

			IS3D-L4050		IS3D-L4100		IS3D-L4300	
			1K	2K	1K	2K	1K	2K
Rango de medición	Distancia de separación		92.00 mm		130.00 mm		180.00 mm	
	Eje Z (altura)	Rango de medición	106.00 mm		235.00 mm		745.00 mm	
	Eje X (ancho)	Campo de visión cercano	55.00 mm		75.00 mm		95.00 mm	
		Campo de visión medio	72.50 mm		127.50 mm		277.50 mm	
		Campo de visión lejano	90.00 mm		180.00 mm		460.00 mm	
Láser (fuente de luz)	Longitud de onda		450 nm					
	Clase de láser		2M					
	Potencia de salida		45 MW					
Tamaño del punto (campo de visión medio)			110 µm		181 µm		240 µm	
Sensor	Puntos de datos		960 puntos	1920 puntos	960 puntos	1920 puntos	960 puntos	1920 puntos
	Resolución X	Superior	57.3 µm	28.6 µm	78.1 µm	39.1 µm	99.0 µm	49.5 µm
		Inferior	93.8 µm	46.9 µm	187.5 µm	93.8 µm	479.2 µm	239.6 µm
	Resolución Z	Superior	2.5 µm		4.4 µm		6.9 µm	
		Inferior	6.9 µm		25.9 µm		147.5 µm	
	Repetibilidad en Z <sup>1</sup>	Superior	0.5 µm		1 µm		2 µm	
		Inferior	0.5 µm		1 µm		2 µm	
	Linealidad en Z <sup>2</sup>		0.06 % de escala completa (F.S.)		0.04 % de escala completa (F.S.)		0.05 % de escala completa (F.S.)	
Características de temperatura		0.01 % de F.S./°C						
Resistencia ambiental	Protección de la carcasa		IP65					
	Temperatura de funcionamiento <sup>3</sup>		0–45 °C (32–113 °F)					
	Temperatura de almacenamiento		-20–70 °C (-4–158 °F)					
	Humedad máxima		De 20 a 80 % (sin condensación)					
	Vibración		De 10 a 57 Hz, doble amplitud 1.5 mm X,Y,Z, 3 horas en cada dirección					
	Impacto		15G/6 ms					
Velocidad de escaneado			Hasta 4 kHz (luego de reducirse paulatinamente el sensor) (*Hasta 6 kHz)					
Material de la carcasa			Aluminio					
Peso			0.94 kg					
Dimensiones			150.5 mm x 101 mm x 45 mm					
Requisitos de la fuente de alimentación			24 VCC +/-10 %, 750 mA mínimo					
Entradas			Disparador/codificador de salida única, enclavamiento láser					
Disparador			Límites del voltaje de entrada: Disp.+ - Disp. - = -24 VCC a +24 VCC Entrada ENCENDIDA: > 10 VCC (>6 mA) Salida APAGADA: < 2 VCC (<1.5 mA)					
Especificaciones del codificador			Diferencial: A+/B+: 5–24 V (1.0 MHz máx.) A-/B-: Invertido (A+/B+) Salida única: A+/B+: 12–24 V (1.0 MHz máx.) A-/B-: VDC = ½ (A+/B+)					
Interfaz			Interfaz Gigabit Ethernet LED de enlace y tráfico integrados Conector hembra estándar con codificación M12-8					

Figura A.7 Tabla de especificaciones IS 3D-L400. [32]

## Apéndice C

En esta sección se encuentra las especificaciones de los dispositivos descritos en la sección 5.2.3 de solución de sistema de movilización.

Model Name		T3-B SCARA Robot
Model Number		T3-B401SS
Mounting Type		Tabletop
Arm Length	Joint #1 plus Joint #2	400 mm
Repeatability	Joints #1 - 2	± 0.020 mm
	Joint #3	± 0.020 mm
	Joint #4	± 0.02 deg
Payload	Rated	1 kg
	Max.	3 kg
Standard Cycle Time <sup>1</sup>		0.52 sec
Max. Motion Range	Joint #1	± 132 deg
	Joint #2	± 141 deg
	Joint #3	150 mm
	Joint #4	± 360 deg
Allowable Moment of Inertia (Joint #4)	Rated	0.003 kg·m <sup>2</sup>
	Max.	0.010 kg·m <sup>2</sup>
Joint #3 Down Force	Max.	83 N
User Electric Lines		Hand I/O: IN6/OUT4 D-Sub 15pin User I/O: IN18/OUT12
User Pneumatic Lines		ø6 mm x2, ø4 mm x1
Brakes		Z-Axis only
Power		AC 100 - 240 V Single Phase
Power Consumption		0.66 kVa
Power Cable Length		5 m
Weight (cables not included)		16 kg: 35 lb
Applicable Controller		Built in
Safety Standards		CE Marking
What's in the Box		T3-B robot, Robot power cable, Epson RC+ software and Epson RC+ Express software, E-Stop unit with cable, T3-B Robot System Safety & Installation Manual, Connector set (I/O, hand I/O and safety circuit connectors)

Figura A.8 Especificaciones de Robot SCARA T3-B Epson. [48]

<b>UR3e</b>		
<b>Especificaciones</b>		
Carga útil	3 kg (6,6 lbs)	
Alcance	500 mm (19,7 in)	
Grados de libertad	6 articulaciones giratorias	
Programación	Pantalla táctil de 12" con interfaz gráfica de usuario Polyscope	
<b>Rendimiento</b>		
Consumo promedio máximo	300 W	
Consumo típico en régimen de operación moderado	100 W	
Seguridad	17 funciones de seguridad configurables	
Certificaciones	EN ISO 13849-1, PLd Categoría 3, y EN ISO 10218-1	
Sensor de fuerza, brida de la herramienta	Fuerza, x-y-z	Par, x-y-z
Rango	30,0 N	10,0 Nm
Resolución	2,0 N	0,1 Nm
Precisión	3,5 N	0,1 Nm
<b>Movimiento</b>		
Repetibilidad según la norma ISO 9283	± 0,03 mm	
Movimiento de ejes	Rango de trabajo	Velocidad máxima
Base	± 360°	± 180°/s
Hombro	± 360°	± 180°/s
Codo	± 360°	± 180°/s
Muñeca 1	± 360°	± 360°/s
Muñeca 2	± 360°	± 360°/s
Muñeca 3	Infinito	± 360°/s
Velocidad TCP estándar	1 m/s (39,4 in/s)	
<b>Funciones</b>		
Clasificación IP	IP54	
Clase ISO 14644-1 Sala limpia	5	
Ruido	Menos de 60 dB(A)	
Montaje del robot	Cualquier orientación	
Puertos de E/S en herramienta		
Entradas digitales	2	
Salidas digitales	2	
Entradas analógicas	2	
Voltaje en E/S de herramienta	12/24 V	
Alimentación E/S herramienta	600 mA	
<b>Características físicas</b>		
Huella	Ø 128 mm	
Materiales	Aluminio, plástico, acero	
Tipo de conector para herramientas	M8   M8 8-pin	
Long. cable del brazo robótico	6 m (236 in) cable incluido. 12 m (472 in) y opciones de alta flexibilidad disponibles.	
Peso con cable	11,2 kg (24,7 lbs)	
Rango de temperatura de funcionamiento	0-50°C	
Humedad	90%RH (sin condensación)	

Figura A.9 Especificaciones UR3e. [37]

## Apéndice D: Tablas de etapas de filtrado

Tabla A.1 Etapa de filtrado #1

Criterios de selección	Conceptos																		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
El sistema es capaz de realizar inspecciones según el plano de la pieza.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es capaz de inspeccionar piezas de diámetros menores a 1mm.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
El sistema es tiene un rango de movimiento de al menos 160 mm	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Permite corregir el enfoque de la cámara de forma automática en caso de que este no sea el correcto.	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+
El sistema es capaz de realizar el movimiento de forma automática.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
El voltaje de alimentación del sistema es de 24V, 110V o 240V	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
El sistema de movilización utiliza una fuente para su movimiento por aire comprimido o electricidad.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es capaz de inspeccionar el producto en menos de 2 minutos.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es de fácil uso y programación por el usuario.	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+
La estación de inspección cuenta con una interfaz donde el usuario pueda interactuar con la máquina y puede visualizar las inspecciones.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-
El sistema tiene la capacidad de inspeccionar diferentes piezas por ciclo de inspección.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
El sistema tiene capacidad de utilizar diferentes tipos de protocolos de comunicación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
El sistema cuenta con la capacidad de almacenar los datos de las inspecciones.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Costo de los equipos menor a \$25 000	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-
<b>Suma +</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>10</b>
<b>Suma 0</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>Suma -</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Calificación total</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>8</b>
<b>Posición</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Etapas</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Combinar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Combinar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Pasa</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Pasa</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasa</b>	<b>Combinar</b>	<b>Pasa</b>	<b>Eliminar</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.2 Proceso de filtrado #2.

Criterios de selección							
	H	K	N	O	P	R	B-E-Q
El sistema es capaz de realizar inspecciones según el plano de la pieza.	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es capaz de inspeccionar piezas de diámetros menores a 1mm.	0	0	0	0	0	0	0
El sistema es tiene un rango de movimiento de al menos 160 mm	+	+	+	+	+	+	+
Permite corregir el enfoque de la cámara de forma automática en caso de que este no sea el correcto.	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es capaz de realizar el movimiento de forma automática.	+	+	+	+	+	+	+
El voltaje de alimentación del sistema es de 24V, 110V o 240V	+	+	+	+	+	+	+
El sistema de movilización utiliza una fuente para su movimiento por aire comprimido o electricidad.	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es capaz de inspeccionar el producto en menos de 2 minutos.	+	+	+	+	+	+	+
El sistema es de fácil uso y programación por el usuario.	+	+	+	+	+	+	+
La estación de inspección cuenta con una interfaz donde el usuario pueda interactuar con la máquina y puede visualizar las inspecciones.	-	-	+	+	+	-	-
El sistema tiene la capacidad de inspeccionar diferentes piezas por ciclo de inspección.	+	+	+	+	+	+	+
El sistema tiene capacidad de utilizar diferentes tipos de protocolos de comunicación	0	0	0	0	0	0	+
El sistema cuenta con la capacidad de almacenar los datos de las inspecciones.	+	+	+	+	+	+	+
Costo de los equipos menor a \$25 000	-	-	-	+	+	+	+
<b>Suma +</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Suma 0</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Suma -</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Calificación total</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Posición</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
<b>Etapas</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Eliminar</b>	<b>Pasa</b>	<b>Combina</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasa</b>	<b>Combina</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A.3 Proceso de filtrado #3

Criterios de selección				
	N	P	R	B-E-Q-O
El sistema es capaz de realizar inspecciones según el plano de la pieza.	+	+	+	+
El sistema es capaz de inspeccionar piezas de diámetros menores a 1mm.	0	0	0	0
El sistema es tiene un rango de movimiento de al menos 160 mm	+	+	+	+
Permite corregir el enfoque de la cámara de forma automática en caso de que este no sea el correcto.	+	+	+	+
El sistema es capaz de realizar el movimiento de forma automática.	+	+	+	+
El voltaje de alimentación del sistema es de 24V, 110V o 240V	+	+	+	+
El sistema de movilización utiliza una fuente para su movimiento por aire comprimido o electricidad.	+	+	+	+
El sistema es capaz de inspeccionar el producto en menos de 2 minutos.	+	+	+	+
El sistema es de fácil uso y programación por el usuario.	+	+	+	+
La estación de inspección cuenta con una interfaz donde el usuario pueda interactuar con la máquina y puede visualizar las inspecciones.	+	+	-	+
El sistema tiene la capacidad de inspeccionar diferentes piezas por ciclo de inspección.	+	+	+	+
El sistema tiene capacidad de utilizar diferentes tipos de protocolos de comunicación	0	0	0	+
El sistema cuenta con la capacidad de almacenar los datos de las inspecciones.	+	+	+	+
Costo de los equipos menor a \$25 000	-	+	+	+
<b>Suma +</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>13</b>
<b>Suma 0</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>Suma -</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>Calificación total</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>13</b>
<b>Posición</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
<b>Etapa</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasa</b>	<b>Pasa</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla A.4 Evaluación de conceptos

Criterios de selección	Conceptos								
	Peso (%)	N		P		R		B-E-Q-O	
		Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado	Calificación	Ponderado
El sistema es capaz de realizar inspecciones según el plano de la pieza.	8,77	5	0,4385	5	0,4385	5	0,4385	5	0,4385
El sistema es capaz de inspeccionar piezas de diámetros menores a 1mm.	8,77	3	0,2631	3	0,2631	3	0,2631	3	0,2631
El sistema es tiene un rango de movimiento de al menos 160 mm	7,02	5	0,351	5	0,351	5	0,351	5	0,351
Permite corregir el enfoque de la cámara de forma automática en caso de que este no sea el correcto.	7,02	5	0,351	5	0,351	5	0,351	5	0,351
El sistema es capaz de realizar el movimiento de forma automática.	8,77	5	0,4385	5	0,4385	5	0,4385	5	0,4385
El voltaje de alimentación del sistema es de 24V, 110V o 240V	5,26	5	0,263	5	0,263	5	0,263	5	0,263
El sistema de movilización utiliza una fuente para su movimiento por aire comprimido o electricidad.	7,02	5	0,351	5	0,351	5	0,351	5	0,351
El sistema es capaz de inspeccionar el producto en menos de 2 minutos.	8,77	5	0,4385	5	0,4385	5	0,4385	5	0,4385
El sistema es de fácil uso y programación por el usuario.	7,02	4	0,2808	4	0,2808	4	0,2808	4	0,2808
La estación de inspección cuenta con una interfaz donde el usuario pueda interactuar con la máquina y puede visualizar las inspecciones.	5,26	5	0,263	5	0,263	1	0,0526	5	0,263
El sistema tiene la capacidad de inspeccionar diferentes piezas por ciclo de inspección.	7,02	5	0,351	5	0,351	5	0,351	5	0,351
El sistema tiene capacidad de utilizar diferentes tipos de protocolos de comunicación	5,26	3	0,1578	3	0,1578	3	0,1578	5	0,263
El sistema cuenta con la capacidad de almacenar los datos de las inspecciones.	7,02	4	0,2808	5	0,351	5	0,351	5	0,351
Costo de los equipos menor a \$25 000	7,02	2	0,1404	5	0,351	5	0,351	5	0,351
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	---	<b>4,3684</b>	---	<b>4,6492</b>	---	<b>4,4388</b>	---	<b>4,7544</b>
<b>Posición</b>		<b>4</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>1</b>	
<b>Etapas</b>		<b>No Desarrollar</b>		<b>No Desarrollar</b>		<b>No Desarrollar</b>		<b>Desarrollar</b>	

Fuente: Elaboración propia

## Apéndice E. Datos de productos

<b>ESPECIFICACIONES</b>			
	<b>In-Sight 7600/7800</b>	<b>In-Sight 7801</b>	<b>In-Sight 7802</b>
Trabajo/memoria del programa	7.2 GB en tablero + 8 GB en tarjeta SD (incluida)		
Memoria de procesamiento de imágenes	512 MB		
Almacenamiento adicional	Tarjeta SD de 8 GB, unidad de red a través de FTP sobre una red gigabit		
Temperatura de funcionamiento	0 ° C a 40 ° C (32 ° C a 104 ° F)		
Resolución	640 x 480/800 x 600	1280 x 1024	1600 x 1200
Cuadros por segundo (FPS)	217/165	76	53
Tipo de lente	Montaje-C/ Montaje-S/ Autoenfoco		
Opciones de iluminación	Visión interna con iluminación de antorcha, otras opciones de iluminación adicional; iluminación externa alimentada por 7000; Energía independiente de iluminación externa		
Color de iluminación interna	Rojo, blanco, azul, IR		
Indicadores LED	Estado del sistema; Anillo indicador LED de visualización de 360 grados		
E/S Integrado	1 entrada de activación ópticamente aislada; 1 entrada dedicada; 2 salidas dedicadas; 2 líneas bidireccionales; RS-232; E/S adicionales disponibles a través de módulos de E/S externas: CIO-MICRO o CIO-1400		
Energía	24 VCC ± 10%, 1,5 A máximo		
Conectores industriales M12	3: Potencia/ES; Ethernet; Energía de iluminación externa/control		
Peso	240 g		
Protección	IP67 con opción de iluminación interna o cubierta de lente de montaje-C		
Comunicaciones de red	10/100/1000 Base T con MDIX automático. IEEE 802.3 Protocolo TCP/IP.		
Soporte IEEE 1588	Resolución del marcado de tiempo: 8 ns Precisión de sincronización a través del reloj transparente: 5 µs		

Figura A.10 Tabla comparativa modelos IS7000. [28]

## TB-SERIES ALL-IN-ONE SPECIFICATIONS

		T3-B	T6-B
Arm length	Arm #1 + #2	400 mm	600 mm
Repeatability	Joints #1, #2	±0.020 mm	±0.040 mm
Payload	Rated	1 kg	2 kg
	Maximum	3 kg	6 kg
Standard cycle time <sup>1</sup>		0.52 sec	0.46 sec
Installation environment		Standard	
Available controllers		Built-in	

<sup>1</sup> Cycle time based on round-trip arch motion (300 mm horizontal, 25 mm vertical).

Figura A.11 Especificaciones Serie TB. [12]

## LSB-SERIES SPECIFICATIONS

		LS3-B	LS6-B	LS10-B	LS20-B
Arm length	Arm #1 + #2	400 mm	500/600/700 mm	600/700/800 mm	800/1,000 mm
Repeatability	Joints #1, #2	±0.010 mm	±0.020 mm	±0.020/±0.020/ ±0.025 mm	±0.025 mm
Payload	Rated	1 kg	2 kg	5 kg	10 kg
	Maximum	3 kg	6 kg	10 kg	20 kg
Standard cycle time <sup>1</sup>		0.42 sec	0.38/0.39/0.42 sec	0.39/0.41/0.44 sec	0.39/0.43 sec
Installation environments		Standard/Cleanroom ISO Class 4			
Available controllers		RC90B			

<sup>1</sup> Cycle time based on round-trip arch motion (300 mm horizontal, 25 mm vertical).

Figura A.12 Especificaciones serie LSB. [12]

## RS-SERIES SPECIFICATIONS

		RS3	RS4
Arm length	Arm #1 + #2	350 mm	550 mm
Repeatability	Joints #1, #2	±0.010 mm	±0.015 mm
Payload	Rated	1 kg	1 kg
	Maximum	3 kg	4 kg
Standard cycle time <sup>1</sup>		0.34 sec	0.39 sec
Installation environments		Standard/Cleanroom ISO Class 3 with ESD	
Available controllers		RC700A	

<sup>1</sup> Cycle time based on round-trip arch motion (300 mm horizontal, 25 mm vertical).

Figura A.13 Especificaciones Serie RS. [12]

## GX-SERIES SPECIFICATIONS

		GX4	GX8
Arm length	Arm #1 + #2	250/300/350 mm	450/550/650 mm
Repeatability	Joints #1, #2	±0.008/ ±0.010 mm	±0.015 mm
Payload	Rated	2 kg	4 kg
	Maximum	4 kg	8 kg
Standard cycle time		0.33/0.34/0.35 sec	0.28/0.30/0.33 sec
Installation environments		Standard/ESD/Cleanroom ISO Class 3 with ESD	Standard/ESD/Cleanroom ISO Class 3 with ESD/Protected IP65
Available controllers		RC700D	

Figura A.14 Especificaciones Serie GX. [12]

## G-SERIES SPECIFICATIONS

		G1	G3	G6	G10	G20
Arm length	Arm #1 + #2	175/225 mm	250/300/350 mm	450/550/650 mm	650/850 mm	850/1,000 mm
Repeatability	Joints #1, #2	±0.005/ ±0.008 mm	±0.008/ ±0.010 mm	±0.015 mm	±0.025 mm	±0.025 mm
Payload	Rated	0.5 kg	1 kg	3 kg	5 kg	10 kg
	Maximum	1 kg	3 kg	6 kg	10 kg	20 kg
Standard cycle time <sup>1</sup>		0.29/0.30 sec	0.36/0.37/0.37 sec	0.33/0.36/0.38 sec	0.34/0.37 sec	0.37/0.42 sec
Installation environments		Standard/Cleanroom ISO Class 3 with ESD		Standard/Cleanroom ISO Class 3 with ESD/Protected IP54 and IP65		
Available controllers		RC700A				

<sup>1</sup> Cycle time based on round-trip arch motion (300 mm horizontal, 25 mm vertical; G1: 100 mm horizontal, 25 mm vertical).

Figura A.15 Especificaciones Serie G. [12]

## Apéndice F. Recursos de validación

Tabla A.5 Iteraciones de colocación de pieza en el soporte.

Iteración	Resultado
1	SI
2	NO
3	SI
4	SI
5	SI
6	SI
7	SI
8	SI
9	SI
10	SI
11	SI
12	SI
13	SI
14	SI
15	SI
16	SI
17	SI
18	SI
19	SI
20	SI
21	SI
22	SI
23	SI
24	SI
25	SI
26	SI
27	SI
28	SI
29	SI
30	SI

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.6 Resultados de repetividad de Sistema de visión.

Iteración	Dimensión									
	Distancia A (±0,001mm)	%Error A	Distancia B (±0,001mm)	% Error B	Distancia C (±0,001mm)	%Error C	Distancia E (±0,001mm)	%Error E	Distancia Total (±0,001mm)	%Error Distancia Total
1	78,973	0,003	3,838	0,026	1,874	0,107	75,872	0,000	154,844	0,001
2	78,972	0,004	3,837	0,000	1,872	0,000	75,874	0,003	154,845	0,001
3	78,973	0,003	3,838	0,026	1,872	0,000	75,872	0,000	154,844	0,001
4	78,972	0,004	3,838	0,026	1,872	0,000	75,870	0,003	154,841	0,003
5	78,973	0,003	3,838	0,026	1,873	0,053	75,874	0,003	154,844	0,001
6	78,974	0,001	3,838	0,026	1,873	0,053	75,873	0,001	154,846	0,000
7	78,974	0,001	3,838	0,026	1,873	0,053	75,873	0,001	154,846	0,000
8	78,974	0,001	3,839	0,052	1,874	0,107	75,876	0,005	154,849	0,002
9	78,975	0,000	3,839	0,052	1,873	0,053	75,875	0,004	154,849	0,002
10	78,975	0,000	3,839	0,052	1,873	0,053	75,875	0,004	154,849	0,002
11	78,976	0,001	3,839	0,052	1,872	0,000	75,873	0,001	154,848	0,001
12	78,975	0,000	3,839	0,052	1,872	0,000	75,873	0,001	154,847	0,001
13	78,973	0,003	3,838	0,026	1,872	0,000	75,872	0,000	154,844	0,001
14	78,973	0,003	3,837	0,000	1,872	0,000	75,873	0,001	154,846	0,000
15	78,973	0,003	3,836	0,026	1,872	0,000	75,874	0,003	154,846	0,000
16	78,974	0,001	3,837	0,000	1,872	0,000	75,875	0,004	154,848	0,001
17	78,974	0,001	3,837	0,000	1,872	0,000	75,876	0,005	154,849	0,002
18	78,975	0,000	3,837	0,000	1,872	0,000	75,876	0,005	154,850	0,003
19	78,975	0,000	3,837	0,000	1,871	0,053	75,875	0,004	154,849	0,002
20	78,972	0,004	3,838	0,026	1,870	0,107	75,873	0,001	154,844	0,001
21	78,974	0,001	3,837	0,000	1,871	0,053	75,871	0,001	154,843	0,002
22	78,975	0,000	3,838	0,026	1,872	0,000	75,873	0,001	154,847	0,001
23	78,974	0,001	3,837	0,000	1,872	0,000	75,874	0,003	154,847	0,001
24	78,974	0,001	3,837	0,000	1,872	0,000	75,875	0,004	154,849	0,002
25	78,974	0,001	3,838	0,026	1,871	0,053	75,873	0,001	154,846	0,000
26	78,974	0,001	3,838	0,026	1,869	0,160	75,869	0,004	154,842	0,003
27	78,972	0,004	3,837	0,000	1,870	0,107	75,871	0,001	154,842	0,003
28	78,974	0,001	3,838	0,026	1,871	0,053	75,873	0,001	154,845	0,001
29	78,974	0,001	3,837	0,000	1,871	0,053	75,872	0,000	154,846	0,000
30	78,974	0,001	3,837	0,000	1,870	0,107	75,875	0,004	154,848	0,001
REFERENCIA	78,975		3,837		1,872		75,872		154,846	
Minimo	78,972	0,000	3,836	0,000	1,869	0,000	75,869	0,000	154,841	0,000
Maximo	78,976	0,004	3,839	0,052	1,874	0,160	75,876	0,005	154,850	0,003
Diferencia	0,004	0,004	0,003	0,052	0,005	0,160	0,007	0,005	0,009	0,003

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.7 Resultados de validación del sistema de inspección completo Pieza 1.

Pieza 1 (BUENA)											
Iteración	Dim A (±0,001mm)	%Error	Dim B (±0,001mm)	%Error	Dim C (±0,001mm)	%Error	Dim E (±0,001mm)	%Error	Dim Total (±0,001mm)	%Error	
1	78,860	0,004	3,549	0,058	1,873	0,005	75,542	0,006	154,713	0,024	
2	78,866	0,004	3,549	0,049	1,874	0,079	75,535	0,003	154,750	0,000	
3	78,866	0,004	3,550	0,073	1,875	0,128	75,539	0,002	154,754	0,002	
4	78,863	0,000	3,547	0,006	1,873	0,006	75,544	0,009	154,747	0,002	
5	78,864	0,001	3,547	0,000	1,888	0,814	75,542	0,007	154,746	0,003	
6	78,865	0,002	3,547	0,006	1,873	0,025	75,540	0,003	154,747	0,002	
7	78,865	0,002	3,547	0,012	1,874	0,045	75,540	0,004	154,751	0,000	
8	78,865	0,002	3,547	0,006	1,874	0,072	75,539	0,003	154,751	0,001	
9	78,866	0,003	3,548	0,030	1,875	0,083	75,538	0,002	154,752	0,001	
10	78,868	0,006	3,548	0,027	1,875	0,124	75,537	0,001	154,752	0,001	
Referencia	78,863	0,000	3,547	0,000	1,873	0,000	75,537	0,000	154,750	0,000	
<b>Mínimo</b>	<b>78,860</b>	<b>0,000</b>	<b>3,547</b>	<b>0,000</b>	<b>1,873</b>	<b>0,005</b>	<b>75,535</b>	<b>0,001</b>	<b>154,713</b>	<b>0,000</b>	
<b>Máximo</b>	<b>78,868</b>	<b>0,006</b>	<b>3,550</b>	<b>0,073</b>	<b>1,888</b>	<b>0,814</b>	<b>75,544</b>	<b>0,009</b>	<b>154,754</b>	<b>0,024</b>	
<b>Diferencia</b>	<b>0,008</b>	<b>0,006</b>	<b>0,003</b>	<b>0,073</b>	<b>0,015</b>	<b>0,809</b>	<b>0,009</b>	<b>0,009</b>	<b>0,041</b>	<b>0,024</b>	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.8 Resultados de validación del sistema de inspección completo Pieza 2.

Pieza 2 (MALA)											
Iteración	Dim A (±0,001mm)	%Error	Dim B (±0,001mm)	%Error	Dim C (±0,001mm)	%Error	Dim E (±0,001mm)	%Error	Dim Total (±0,001mm)	%Error	
1	79,286	0,001	3,894	0,025	1,675	0,515	74,738	0,004	154,504	0,001	
2	79,290	0,003	3,898	0,140	1,665	0,035	74,735	0,001	154,511	0,003	
3	79,289	0,002	3,898	0,128	1,666	0,029	74,735	0,000	154,511	0,003	
4	79,274	0,016	3,883	0,247	1,674	0,495	74,743	0,011	154,508	0,001	
5	79,281	0,007	3,890	0,073	1,675	0,520	74,740	0,007	154,505	0,001	
6	79,288	0,002	3,898	0,120	1,665	0,061	74,736	0,001	154,507	0,001	
7	79,286	0,001	3,895	0,047	1,664	0,105	74,737	0,003	154,509	0,002	
8	79,289	0,003	3,898	0,141	1,665	0,049	74,735	0,000	154,508	0,002	
9	79,289	0,003	3,900	0,171	1,666	0,021	74,735	0,001	154,509	0,002	
10	79,289	0,003	3,900	0,168	1,666	0,006	74,734	0,001	154,509	0,002	
Referencia	79,287		3,893		1,666		74,735		154,506		
<b>Mínimo</b>	<b>79,274</b>	<b>0,001</b>	<b>3,883</b>	<b>0,025</b>	<b>1,664</b>	<b>0,006</b>	<b>74,734</b>	<b>0,000</b>	<b>154,504</b>	<b>0,001</b>	
<b>Máximo</b>	<b>79,290</b>	<b>0,016</b>	<b>3,900</b>	<b>0,247</b>	<b>1,675</b>	<b>0,520</b>	<b>74,743</b>	<b>0,011</b>	<b>154,511</b>	<b>0,003</b>	
<b>Diferencia</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>	<b>0,222</b>	<b>0,010</b>	<b>0,514</b>	<b>0,009</b>	<b>0,011</b>	<b>0,007</b>	<b>0,003</b>	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.9 Resultados de validación del sisma de inspección completo Pieza 3.

Pieza 3 (MALA)											
Iteración	Dim A (±0,001mm)	%Error	Dim B (±0,001mm)	%Error	Dim C (±0,001mm)	%Error	Dim E (±0,001mm)	%Error	Dim Total (±0,001mm)	%Error	
1	79,228	0,003	3,696	2,734	1,704	1,547	75,003	0,004	154,377	0,001	
2	79,234	0,005	3,698	2,790	1,700	1,287	74,999	0,001	154,381	0,001	
3	79,231	0,002	3,544	1,510	1,699	1,253	75,000	0,001	154,382	0,002	
4	79,218	0,015	3,697	2,751	1,701	1,399	75,008	0,010	154,380	0,001	
5	79,225	0,006	3,698	2,782	1,698	1,192	75,004	0,006	154,379	0,000	
6	79,230	0,000	3,699	2,806	1,675	0,179	75,001	0,002	154,379	0,000	
7	79,229	0,002	3,699	2,819	1,702	1,429	75,002	0,002	154,382	0,002	
8	79,231	0,002	3,544	1,489	1,684	0,358	75,000	0,000	154,380	0,000	
9	79,232	0,002	3,546	1,456	1,676	0,119	74,999	0,001	154,379	0,000	
10	79,232	0,002	3,545	1,462	1,701	1,371	74,999	0,002	154,378	0,000	
Referencia	79,23		3,598		1,678		75,000		154,379		
<b>Mínimo</b>	<b>79,218</b>	<b>0,000</b>	<b>3,544</b>	<b>1,456</b>	<b>1,675</b>	<b>0,119</b>	<b>74,999</b>	<b>0,000</b>	<b>154,377</b>	<b>0,000</b>	
<b>Máximo</b>	<b>79,234</b>	<b>0,015</b>	<b>3,699</b>	<b>2,819</b>	<b>1,704</b>	<b>1,547</b>	<b>75,008</b>	<b>0,010</b>	<b>154,382</b>	<b>0,002</b>	
<b>Diferencia</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,156</b>	<b>1,363</b>	<b>0,029</b>	<b>1,428</b>	<b>0,009</b>	<b>0,010</b>	<b>0,005</b>	<b>0,002</b>	

Fuente: Elaboración propia

Tabla A.10 Resultados de validación del sistema de inspección Pieza 4.

Pieza 4 (BUENA)											
Iteración	Dim A (±0,001mm)	%Error	Dim B (±0,001mm)	%Error	Dim C (±0,001mm)	%Error	Dim E (±0,001mm)	%Error	Dim Total (±0,001mm)	%Error	
1	79,483	0,000	3,899	0,053	1,871	0,085	75,266	0,005	154,436	0,003	
2	79,487	0,006	3,900	0,025	1,871	0,086	75,263	0,001	154,441	0,000	
3	79,483	0,000	3,901	0,005	1,872	0,072	75,266	0,003	154,441	0,000	
4	79,475	0,011	3,900	0,022	1,870	0,135	75,270	0,009	154,437	0,002	
5	79,481	0,002	3,902	0,017	1,875	0,085	75,266	0,004	154,439	0,001	
6	79,484	0,001	3,902	0,013	1,872	0,052	75,264	0,002	154,442	0,000	
7	79,482	0,001	3,902	0,013	1,872	0,057	75,265	0,003	154,442	0,001	
8	79,485	0,002	3,903	0,062	1,872	0,056	75,264	0,001	154,442	0,001	
9	79,486	0,003	3,903	0,044	1,872	0,039	75,263	0,000	154,441	0,000	
10	79,487	0,005	3,903	0,050	1,872	0,028	75,263	0,001	154,441	0,000	
Referencia	79,483		3,901		1,873		75,263		154,441		
<b>Mínimo</b>	<b>79,475</b>	<b>0,000</b>	<b>3,899</b>	<b>0,005</b>	<b>1,870</b>	<b>0,028</b>	<b>75,263</b>	<b>0,000</b>	<b>154,436</b>	<b>0,000</b>	
<b>Máximo</b>	<b>79,487</b>	<b>0,011</b>	<b>3,903</b>	<b>0,062</b>	<b>1,875</b>	<b>0,135</b>	<b>75,270</b>	<b>0,009</b>	<b>154,442</b>	<b>0,003</b>	
<b>Diferencia</b>	<b>0,013</b>	<b>0,010</b>	<b>0,004</b>	<b>0,057</b>	<b>0,004</b>	<b>0,106</b>	<b>0,007</b>	<b>0,009</b>	<b>0,006</b>	<b>0,003</b>	

Fuente: Elaboración Propia

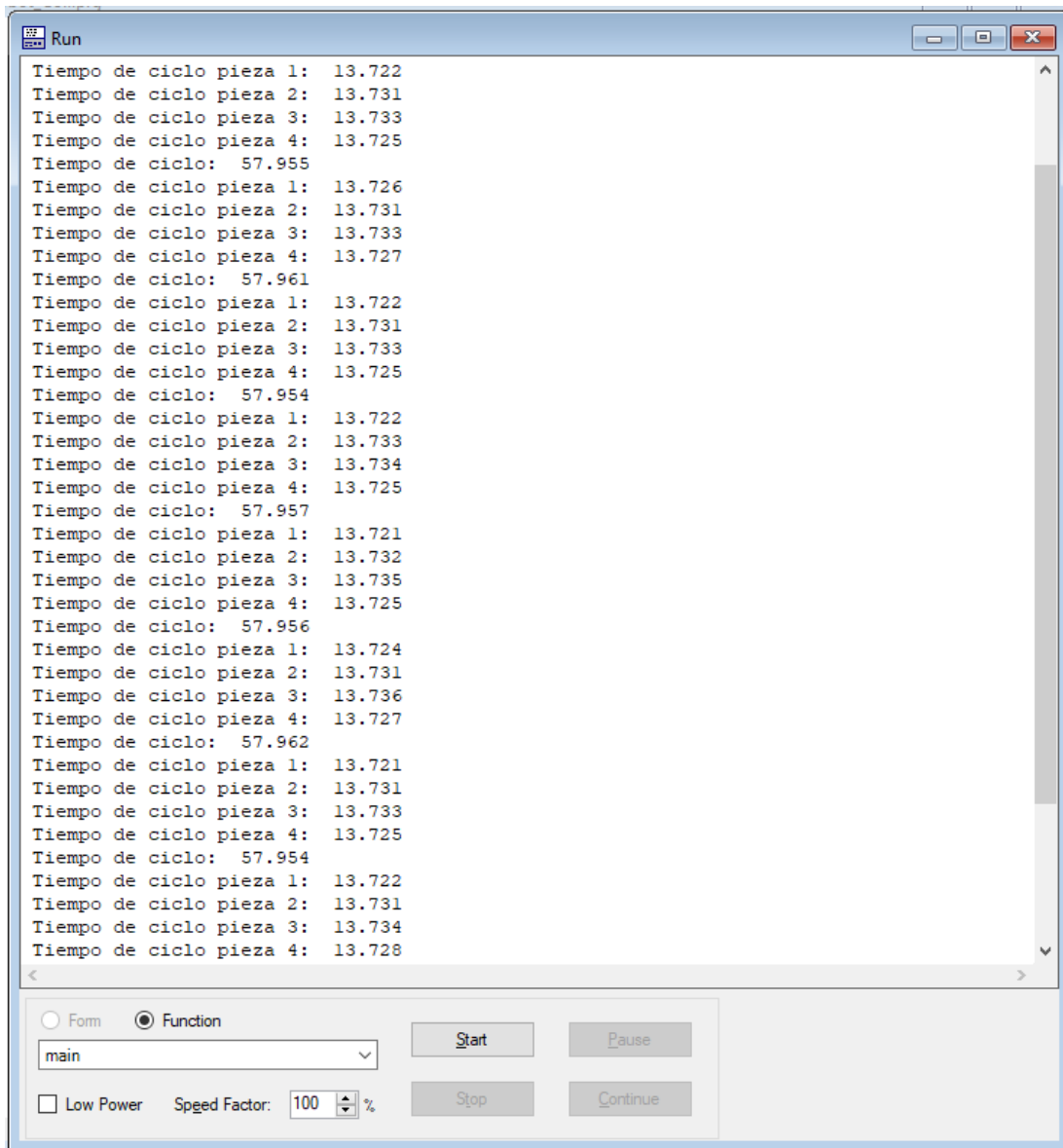


Figura A.16 Tiempos de ciclo obtenidos del programa del robot. Elaboración Propia

Fecha y hora	Pieza	Dim A	Dim B	Dim C	Dim E	Dim Total	Resultado
11/09/2022 15:08:32.454	Coil 1	78.868	3.545	1.874	75.890	154.757	OK
11/09/2022 15:08:35.031	Coil 2	79.293	3.892	1.665	75.306	154.523	MALO
11/09/2022 15:08:37.563	Coil 3	79.323	4.036	1.700	75.400	154.140	MALO
11/09/2022 15:08:40.114	Coil 4	79.278	3.897	1.871	75.611	154.235	OK
11/09/2022 15:08:42.630	Coil 1	78.867	3.544	1.875	75.895	154.761	OK
11/09/2022 15:08:45.194	Coil 2	79.291	3.892	1.666	75.305	154.523	MALO
11/09/2022 15:08:47.738	Coil 3	79.320	3.881	1.699	75.401	154.141	MALO
11/09/2022 15:08:50.313	Coil 4	79.273	3.898	1.872	75.610	154.235	OK
11/09/2022 15:08:52.860	Coil 1	78.865	3.543	1.873	75.891	154.754	OK
11/09/2022 15:08:55.419	Coil 2	79.277	3.877	1.674	75.304	154.520	MALO
11/09/2022 15:08:57.949	Coil 3	79.307	4.035	1.701	75.400	154.139	MALO
11/09/2022 15:09:00.533	Coil 4	79.265	3.897	1.870	75.607	154.231	OK
11/09/2022 15:09:03.101	Coil 1	78.866	3.543	1.873	75.889	154.753	MALO
11/09/2022 15:09:05.661	Coil 2	79.285	3.885	1.675	75.301	154.516	MALO
11/09/2022 15:09:08.212	Coil 3	79.314	4.036	1.517	75.399	154.138	MALO
11/09/2022 15:09:10.757	Coil 4	79.271	3.898	1.875	75.609	154.233	OK
11/09/2022 15:09:13.318	Coil 1	78.867	3.543	1.873	75.889	154.754	OK
11/09/2022 15:09:15.852	Coil 2	79.292	3.892	1.665	75.302	154.519	MALO
11/09/2022 15:09:18.363	Coil 3	79.318	4.037	1.516	75.398	154.138	MALO
11/09/2022 15:09:20.932	Coil 4	79.274	3.898	1.872	75.610	154.236	OK
11/09/2022 15:09:23.476	Coil 1	78.867	3.543	1.874	75.892	154.758	OK
11/09/2022 15:09:26.048	Coil 2	79.289	3.889	1.664	75.304	154.521	MALO
11/09/2022 15:09:28.615	Coil 3	79.317	4.037	1.702	75.400	154.141	MALO
11/09/2022 15:09:32.780	Coil 4	79.273	3.898	1.872	75.611	154.236	OK
11/09/2022 15:09:35.327	Coil 1	78.867	3.542	1.874	75.894	154.758	OK
11/09/2022 15:09:37.897	Coil 2	79.292	3.892	1.665	75.303	154.520	MALO
11/09/2022 15:09:40.393	Coil 3	79.320	3.882	1.513	75.397	154.139	MALO
11/09/2022 15:09:43.010	Coil 4	79.274	3.900	1.872	75.610	154.236	OK
11/09/2022 15:09:45.574	Coil 1	78.867	3.543	1.875	75.894	154.759	OK
11/09/2022 15:09:48.124	Coil 2	79.292	3.893	1.666	75.302	154.521	MALO
11/09/2022 15:09:50.710	Coil 3	79.320	3.883	1.512	75.395	154.138	MALO
11/09/2022 15:09:53.232	Coil 4	79.276	3.899	1.872	75.609	154.235	OK
11/09/2022 15:09:55.810	Coil 1	78.869	3.543	1.875	75.892	154.759	OK
11/09/2022 15:09:58.367	Coil 2	79.292	3.893	1.666	75.303	154.521	MALO
11/09/2022 15:10:00.909	Coil 3	79.320	3.883	1.512	75.394	154.137	MALO
11/09/2022 15:10:03.452	Coil 4	79.277	3.899	1.872	75.609	154.235	OK

Figura A.17 Cuadro generado con la información al almacenar los datos de inspección. Elaboración propia

## Apéndice G. Programación del sistema de visión

Image						
<b>Calibración</b>						
Edge Calibration						
Dimension	Units				0.8700 mm	
0.870	Millimeters	<input type="checkbox"/>	Classic Orientation	<input type="checkbox"/>	Active	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Region0	117.417	906.607	681.572	237.823	270.000	0.000
<input type="checkbox"/> Region1	897.866	217.635	192.912	349.978	90.000	0.000
<input type="checkbox"/> Edges	246.750	906.607	246.750	225.607	246.750	566.107
<input type="checkbox"/> Edges	811.188	217.635	811.188	409.635	0.000	0.000
<input type="checkbox"/> Dist	246.750	566.107	811.187	566.107	564.437	1.000
<input type="checkbox"/> Calibrate		<input type="checkbox"/> Plot	<input type="checkbox"/> Plot	<input type="checkbox"/> Plot	<input type="checkbox"/> LatchImage	
246.750	566.107	811.187	566.107	16.667	Image	
			1600.000	1200.000	Calib	Calib
1.000	0.870	564.437	2.466	1.850	Calib	mm
						End
Imagen calibrada						
Image						

Figura A.18 Bloque de calibración de la imagen. Elaboración propia

<b>Distancia derecha</b>						<b>0.000</b>		
<b>Dibuja línea de referencia en el centro de la imagen</b>								
	Row 0	Column 0	Row 1	Column 1				
Plot	0.000	800.000	1200.000	800.000				
<b>Encuentra el costado de la pieza para utilizarlo como herramienta de referencia</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
Edges	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000			
<b>Encuentra el inicio de la pieza, Herramienta en píxeles</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000			
<b>Encuentra el inicio de la pieza, Herramienta en milímetros</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000			
<b>Distancia entre la pieza y el centro de la imagen</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	Distance (mm)	Valor a utilizar
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR

Figura A.19 Bloque de medición del borde derecho. Elaboración propia

Primera vuelta separada						0.000		
Dibuja línea de referencia en el centro de la imagen								
	Row 0	Column 0	Row 1	Column 1				
Plot	0.000	800.000	1200.000	800.000				
Encuentra la primera vuelta separada. Herramienta en píxeles								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
Edges	264.175	1402.000	320.175	1402.000	-22.925			
Encuentra la primera vuelta separada. Herramienta en milímetros								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
Edges	2.161	0.407	2.161	0.494	-22.925			
Distancia entre la primera vuelta separada y el centro de la imagen								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	Distance (mm)	Valor a utilizar para mover
Dist	0.000	800.000	0.000	1402.000	90.000	602.000	0.928	Izquierda Derecha
							0.928	-0.928

Figura A.20 Bloque de búsqueda de la primera vuelta separada. Elaboración propia

Conteo Vueltas							0.000								
Conteo de vueltas, Herramienta en Pixeles								Conteo de vueltas, Herramienta en milímetros							
Edges	10.000						Edges	10.000							
Distancia entre cada vuelta, Herramienta en pixeles								Distancia entre cada vuelta, Herramienta en milímetros							
	Index	Row0	Col0	Row1	Col1	Score		Index	Row0	Col0	Row1	Col1	Score		
Edges	0.000	748.195	122.207	777.195	122.207	-28.815	Edges	0.000	0.188	1.153	0.188	1.198	-28.815		
	1.000	748.195	244.352	777.195	244.352	-28.865		1.000	0.377	1.153	0.377	1.198	-28.865		
	2.000	748.195	366.281	777.195	366.281	-24.662		2.000	0.565	1.153	0.565	1.198	-24.662		
	3.000	748.195	489.484	777.195	489.484	-30.546		3.000	0.754	1.153	0.754	1.198	-30.546		
	4.000	748.195	611.555	777.195	611.555	-30.453		4.000	0.943	1.153	0.943	1.198	-30.453		
	5.000	748.195	734.145	777.195	734.145	-28.693		5.000	1.132	1.153	1.132	1.198	-28.693		
	6.000	748.195	856.711	777.195	856.711	-30.955		6.000	1.320	1.153	1.320	1.198	-30.955		
	7.000	748.195	978.395	777.195	978.395	-33.068		7.000	1.508	1.153	1.508	1.198	-33.068		
	8.000	748.195	1100.813	777.195	1100.813	-32.004		8.000	1.697	1.153	1.697	1.198	-32.004		
	9.000	748.195	1219.945	777.195	1219.945	-32.931		9.000	1.880	1.153	1.880	1.198	-32.931		

Figura A.21 Bloque de conteo de vueltas. Elaboración propia

<b>Ultima vuelta separada</b>						<b>0.000</b>	
<b>Dibuja linea de referencia en el centro de la imagen</b>							
	Row 0	Column 0	Row 1	Column 1			
Plot	0.000	800.000	1200.000	800.000			
<b>Encuentra la ultima vuelta separada. Herramienta en pixeles</b>							
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score		
Edges	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000		
<b>Encuentra la ultima vuelta separada. Herramienta en milímetros</b>							
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score		
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000		
<b>Distancia entre la ultima vuelta separada y el centro de la imagen</b>							
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	Distance (mm)
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR

Figura A.22 Bloque de búsqueda de la última vuelta separada. Elaboración propia

<b>Distancia izquierda</b>						0.000		
<b>Dibuja línea de referencia en el centro de la imagen</b>								
	Row 0	Column 0	Row 1	Column 1				
Plot	0.000	800.000	1200.000	800.000				
<b>Encuentra el costado de la pieza para utilizarlo como herramienta de referencia</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
Edges	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000			
<b>Encuentra el final de la pieza, Herramienta en píxeles</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000			
<b>Encuentra el final de la pieza, Herramienta en milímetros</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Score			
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000			
<b>Distancia entre la pieza y el centro de la imagen</b>								
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	Distance (mm)	Valor a utilizar
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR

Figura A.23 Bloque de búsqueda del borde izquierdo. Elaboración propia

Distancia A															
	1.000	0.000	0.000	0.000											
Distancia	#ERR	0.872	2.010	1.391											
Distancia B															
	1.000	0.000	0.000	0.000											
Distancia	#ERR	-0.075	1.063	#ERR											
Distancia C															
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance			Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	
Dist	748.195	122.207	748.195	1219.944	90.000	1097.737		Dist	0.188	1.153	1.880	1.153	0.000	1.692	1.000
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance			Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	
#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR		#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR	0.000
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance			Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	
Dist	748.195	122.207	748.195	1219.944	90.000	1097.737		Dist	0.188	1.153	1.880	1.153	0.000	1.692	0.000
	Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance			Row0	Col0	Row1	Col1	Angle	Distance	
Dist	748.195	122.207	748.195	1219.944	90.000	1097.737		Dist	0.188	1.153	1.880	1.153	0.000	1.692	0.000

Figura A.24 Bloque de cálculo de distancias A - B - C. Elaboración propia

Distancia E				
	1.000	0.000	0.000	0.000
Distancia	-0.928	0.210	-0.928	-0.928
Distancia Total				
	1.000	0.000	0.000	0.000
Distancia	#ERR	#ERR	#ERR	#ERR
Comunicación con el Robot T3-B				
Device	Read	0.000	Event	80.000
Device	Read			Extracción Valor
Device	Read	0.000		0.000
Device	Read			0.000
	Write	0.000	Event	84.000
				0
				0.000
				0.000
Coil 1	Coil 2	Coil 3	Coil 4	
Distancia A	0.000	0.000	0.000	0.000
Distancia B	0.000	0.000	0.000	0.000
Distancia C	0.000	0.000	0.000	0.000
Distancia E	0.000	0.000	0.000	0.000
Distancia Total	0.000	0.000	0.000	0.000
Pasa/Falla	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
				<input type="checkbox"/> Activación <input checked="" type="checkbox"/> Resultados Finales

Figura A.25 Bloque de cálculo de distancias E - Total, Comunicación con el robot, Visualización de los datos completos. Elaboración propia

Almacenamiento y envío de datos			
11/09/2022 15:1	FTP	0.000	
11/09/2022 15:1	FTP	0.000	
11/09/2022 15:1	FTP	0.000	
11/09/2022 15:1	FTP	1.000	
Time	11/09/2022 15:10:03.452		

Figura A.26 Bloque Almacenamiento y envío de datos. Elaboración propia

## Apéndice H. Programación del Robot T3-B

```
Function main

    Call encender_motores 'Llama funcion de encender motores

    Real dimA, dimB, dimE, dimT 'define variables

    Integer activacion 'definición de variable

    Call Abrir_Com_Camara 'Llama la funcion de comunicación con la camara

Do

    Print #204, "recibir" 'Envia señal para recibir datos
    Input #204, activacion 'escribe los datos en la variable

    If activacion = 1 Then

        Print #203, "Reset_on" 'Resetea contador de la camara
        Wait 0.1
        Print #203, "Reset_off" 'Apaga la señal de reseteo

        TmReset (0) 'Inicia timer total

        TmReset (1) 'inicia timer ciclo 1

        Move Inicial 'se mueve al punto 1 de inspección de pieza 1
        Wait 1
        Print #201, "trigger_on" 'Envia trigger a la camara
        Wait 0.1
        Print #201, "trigger_off" 'Apaga el trigger

        Move Inedgel 'se mueve al punto 2 de inspección de pieza 1
        Wait 1
        Print #201, "trigger_on"
        Wait 0.1
        Print #201, "trigger_off"

        Move Conteol 'se mueve al punto 3 de inspección de pieza 1
        Wait 1
        Print #201, "trigger_on"
        Wait 0.5
        Print #201, "trigger_off"

        Move Fedgel 'se mueve al punto 4 de inspección de pieza 1
        Wait 1
        Print #201, "trigger_on"
        Wait 0.1
        Print #201, "trigger off"
```

*Figura A.27 Programación Robot bloque 1. Elaboración propia*

```

Move Fin1 'se mueve al punto 5 de inspección de pieza 1
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"
Print "Tiempo de ciclo pieza 1: ", Tmr(1) 'Imprime tiempo de ciclo 1

dimA = Dist(Inedgel, Fin1) 'Asigna valores de recorrido a las variables
dimB = Dist(Inedgel, Fedgel)
dimE = Dist(Iniciol, Inedgel)
dimT = Dist(Iniciol, Fin1)

Print #202, dimA, dimE, dimT, dimB 'Envia valores de recorrido a la camara

Wait 1

TmReset (2) 'inicia timer ciclo 2

Move Inicio2 'se mueve al punto 1 de inspección de pieza 2
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Inedge2 'se mueve al punto 2 de inspección de pieza 2
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Conteo2 'se mueve al punto 3 de inspección de pieza 2
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.5
Print #201, "trigger_off"

Move Fedge2 'se mueve al punto 4 de inspección de pieza 2
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Fin2 'se mueve al punto 5 de inspección de pieza 2
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Print "Tiempo de ciclo pieza 2: ", Tmr(2) 'Imprime tiempo de ciclo 2

```

*Figura A.28 Programación Robot bloque 2. Elaboración propia*

```

dimA = Dist(Inedge2, Fin2) 'Asigna valores de recorrido a las variables
dimB = Dist(Inedge2, Fedge2)
dimE = Dist(Inicio2, Inedge2)
dimT = Dist(Inicio2, Fin2)

Print #202, dimA, dimE, dimT, dimB 'Envia valores de recorrido a la camara

Wait 1

TmReset (3) 'inicia timer ciclo 3

Move Inicio3 'se mueve al punto 1 de inspección de pieza 3
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Inedge3 'se mueve al punto 2 de inspección de pieza 3
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Conteo3 'se mueve al punto 3 de inspección de pieza 3
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.5
Print #201, "trigger_off"

Move Fedge3 'se mueve al punto 4 de inspección de pieza 3
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Fin3 'se mueve al punto 5 de inspección de pieza 3
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"
Print "Tiempo de ciclo pieza 3: ", Tmr(3) 'Imprime tiempo de ciclo 3

dimA = Dist(Inedge3, Fin3) 'Asigna valores de recorrido a las variables
dimB = Dist(Inedge3, Fedge3)
dimE = Dist(Inicio3, Inedge3)
dimT = Dist(Inicio3, Fin3)

Print #202, dimA, dimE, dimT, dimB 'Envia valores de recorrido a la camara

Wait 1

```

*Figura A.29 Programación del Robot bloque 3. Elaboración propia*

```

TmReset (4) 'inicia timer ciclo 4

Move Inicio4 'se mueve al punto 1 de inspección de pieza 4
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Inedge4 'se mueve al punto 2 de inspección de pieza 4
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Conteo4 'se mueve al punto 3 de inspección de pieza 4
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.5
Print #201, "trigger_off"

Move Fedge4 'se mueve al punto 4 de inspección de pieza 4
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Move Fin4 'se mueve al punto 5 de inspección de pieza 4
Wait 1
Print #201, "trigger_on"
Wait 0.1
Print #201, "trigger_off"

Print "Tiempo de ciclo pieza 4: ", Tmr(4) 'Imprime tiempo de ciclo 3

dimA = Dist(Inedge4, Fin4) 'Asigna valores de recorrido a las variables
dimB = Dist(Inedge4, Fedge4)
dimE = Dist(Inicio4, Inedge4)
dimT = Dist(Inicio4, Fin4)
Print #202, dimA, dimE, dimT, dimB 'Envia valores de recorrido a la camara

Print "Tiempo de ciclo: ", Tmr(0) 'Imprime tiempo de ciclo completo
Close All

```

*Figura A.30 Programación del Robot bloque 4. Elaboración propia*

```

        Wait 1

        Print #204, "recibir"
        Input #204, activacion

    Else

        GoTo regreso

    EndIf

Loop

Close All
Fend

```

---

```

Function encender_motores
    If ErrorOn Then Reset
    If Not Motor Then Motor On
    ' If Not Power Then Power High
    ''
    ' Speed 5 '%'
    ' Accel 15, 15 '%'
    ' SpeedS 250 'mm/s
    ' AccelS 250 'mm/s2
    '
Fend

```

Figura A.31 Programación del Robot bloque 5. Elaboración propia

```

Function Abrir_Com_Camara
    SetNet #201, "192.168.60.87", 3000, CRLF, NONE, 0, TCP
    OpenNet #201 As Client          'abrir puerto
    WaitNet #201                   'espera conexion

    SetNet #202, "192.168.60.87", 3001, CRLF, NONE, 0, TCP
    OpenNet #202 As Client          'abrir puerto
    WaitNet #202                   'espera conexion

    SetNet #203, "192.168.60.87", 3002, CRLF, NONE, 0, TCP
    OpenNet #203 As Client          'abrir puerto
    WaitNet #203                   'espera conexion

    SetNet #204, "192.168.60.87", 3003, CRLF, NONE, 0, TCP
    OpenNet #204 As Client          'abrir puerto
    WaitNet #204

Fend

```

Figura A.32 Programación del Robot Bloque de comunicación con sistema de visión. Elaboración Propia

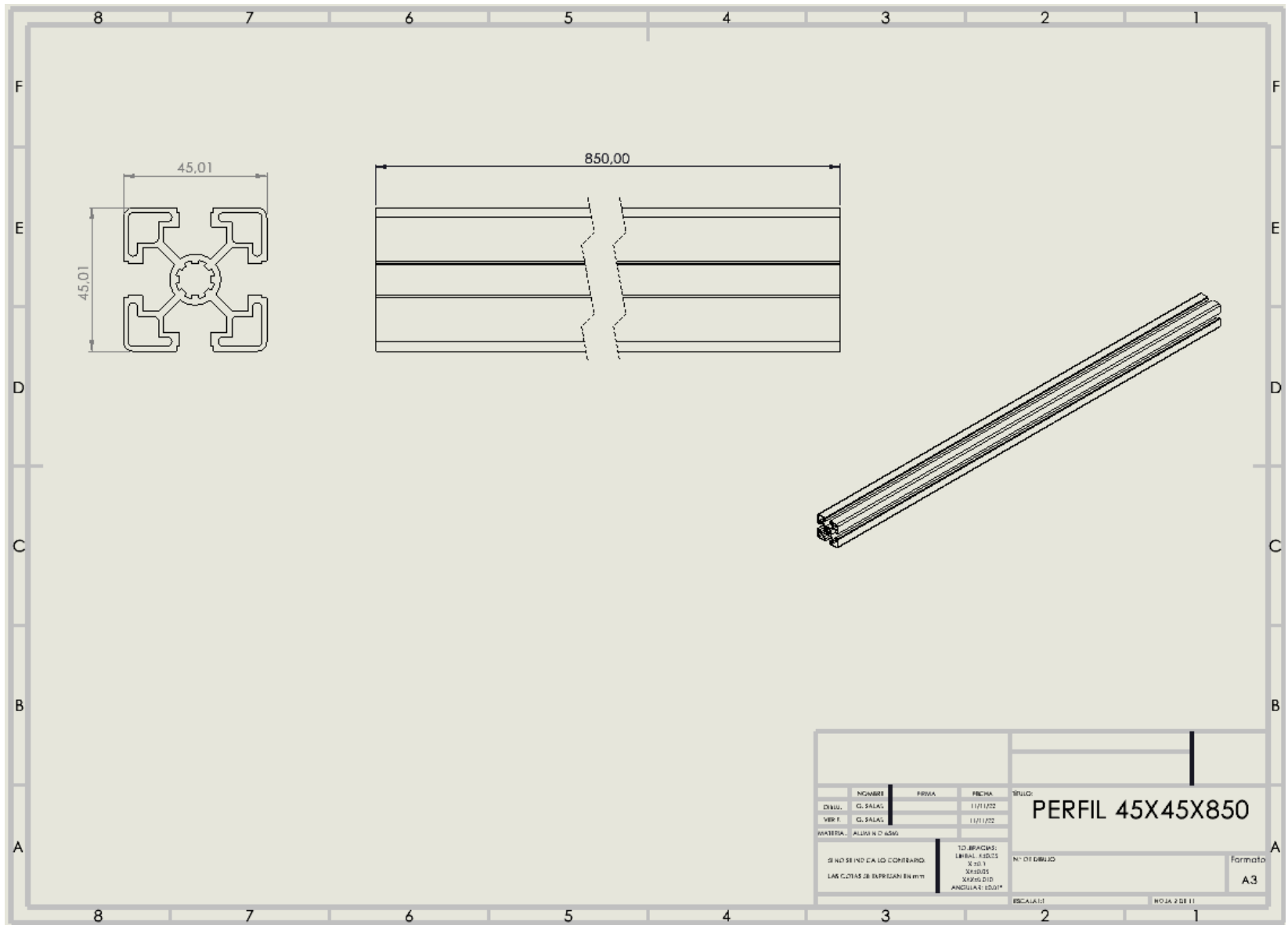
## Apéndice I. Planos

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	PERFIL 45X45X850	T-Slotted Framing	8
2	PERFIL 45X45X650	T-Slotted Framing	15
3	ESCUADRA	T-Slotted Framing	12
4	UNION RECTA	T-Slotted Framing	4
5	PERFIL 45X45X200	T-Slotted Framing	2
6	UNION RECTA	T-Slotted Framing	8
7	TAPA DE PERFIL	T-Slotted Framing	4
8	ROSCA AUTOAJUSTABLE	T-Slotted Framing Fasteners	68
9	ROSCA AUTOAJUSTABLE	T-Slotted Framing Fasteners	4
10	Base Robot		1
11	Base Mesa		1
12	SopORTE Luz		2
13	RIEL DIN	Steel DIN 3 Rail	1
14	SOPORTE AJUSTABLE	T-Slotted Framing	4
15	ESQUINAS	T-Slotted Framing	4
16	PANEL SUPERIOR	T-Slotted Framing	1
17	PANEL LATERAL	T-Slotted Framing	2
18	SOPORTE PANEL	T-Slotted Framing	20
19	PANEL TRASERO	T-Slotted Framing	1
20	PANEL FRONTAL	T-Slotted Framing	1
21	TORNILLERIA	Fine-Thread 316 Stainless Steel Hex Drive Flat Head Screw	9
22	TORNILLERIA	Super-Corrosion-Resistant 316 Stainless Steel Socket Head Screw	88
23	TORNILLERIA	18-8 Stainless Steel Socket Head Screw	4
24	TORNILLERIA	Super-Corrosion-Resistant 316 Stainless Steel Socket Head Screw	4

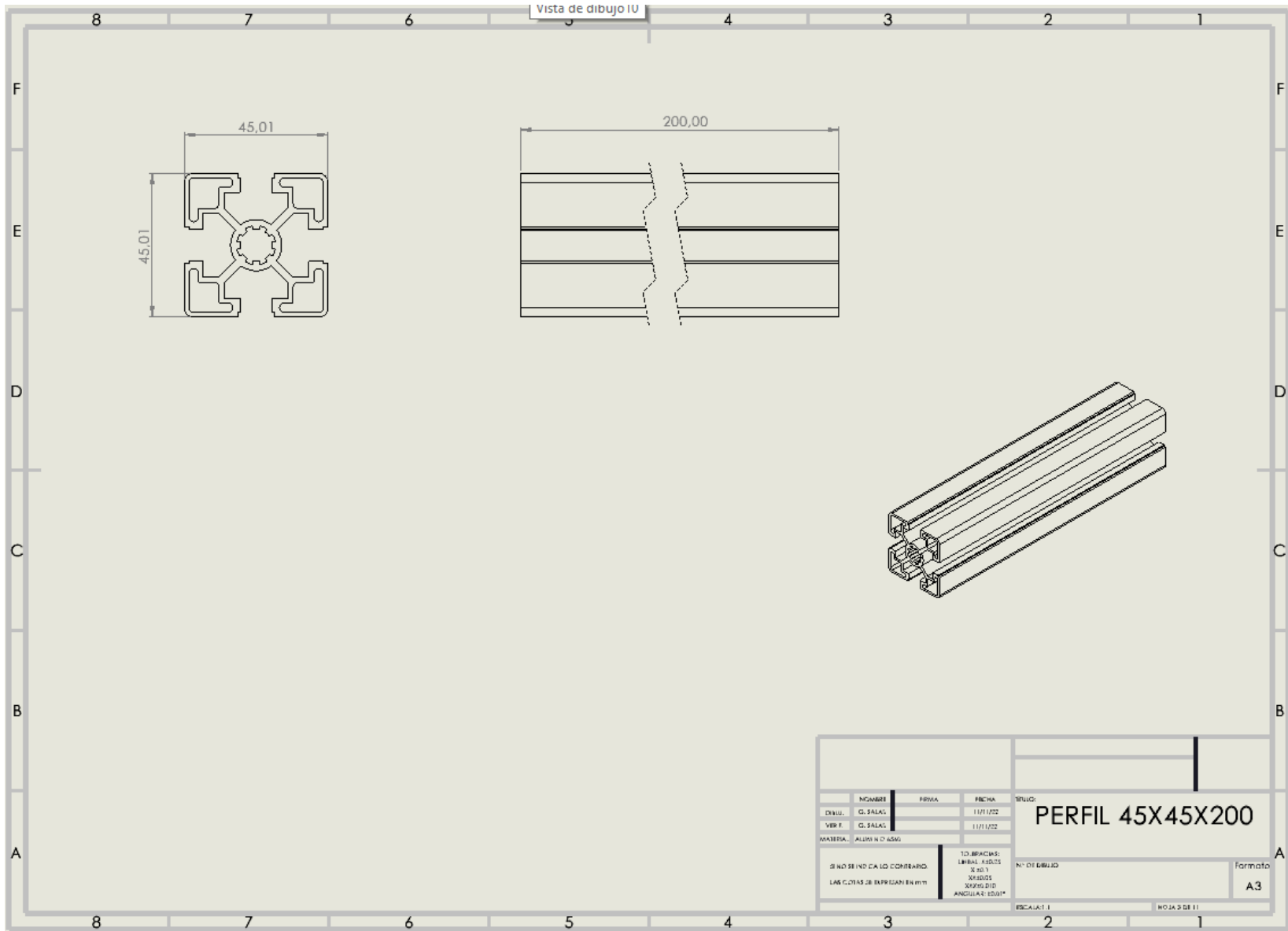
NOMBRE	PIEZA	PIEZA	TIPO
DISEÑO	Q. SALAS	1/1/1/22	
VERSIÓN	Q. SALAS	1/1/1/22	
MATERIAL: ALUMINIO 6063			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO		TOLERANCIAS:	
LAS COTAS SE BARRIGAN EN MM		LINEAL: ±0.25	
		ANGULAR: ±0.50	

ESTRUCTURA

ESCALA: 1:2
Formato: A3

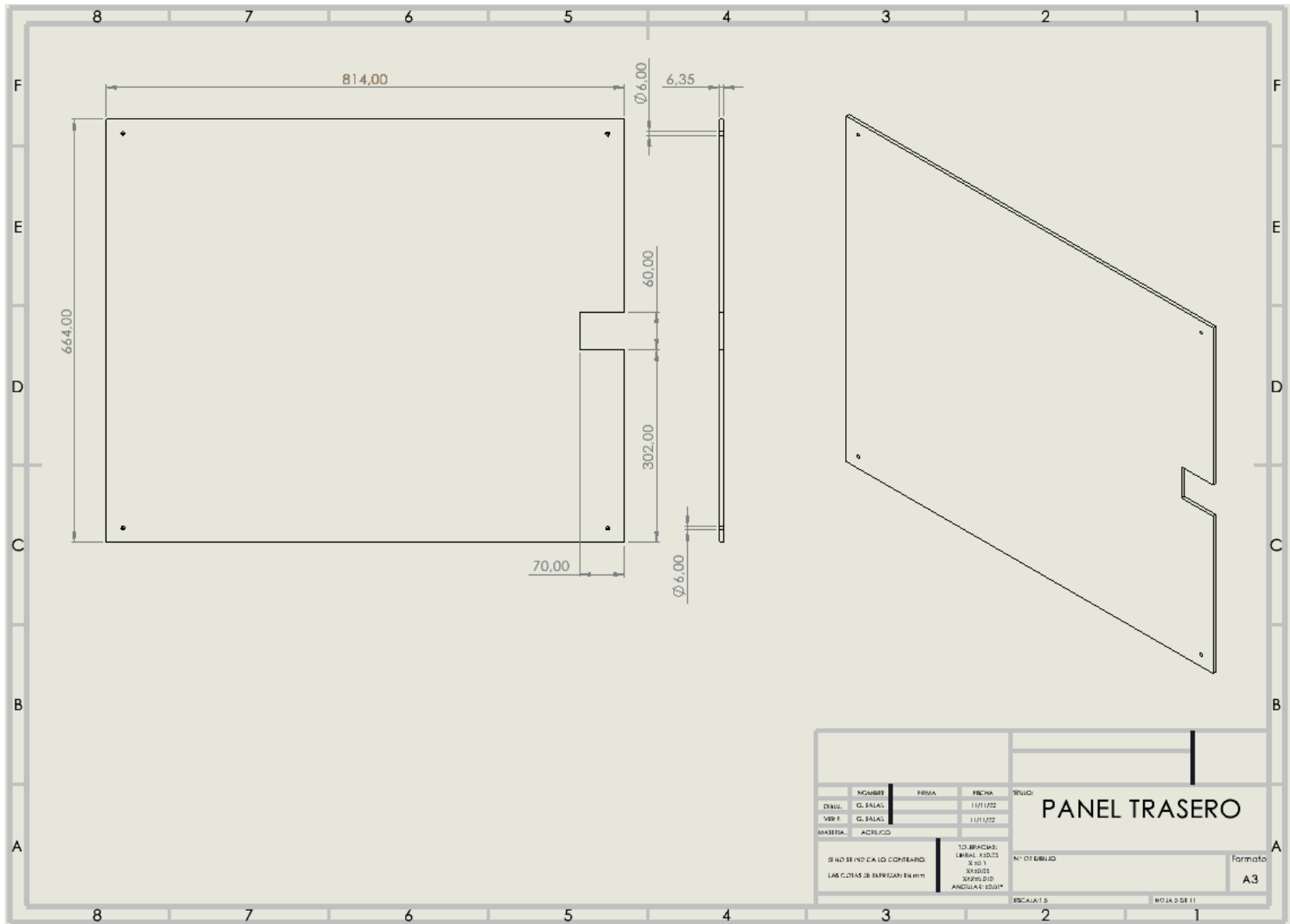


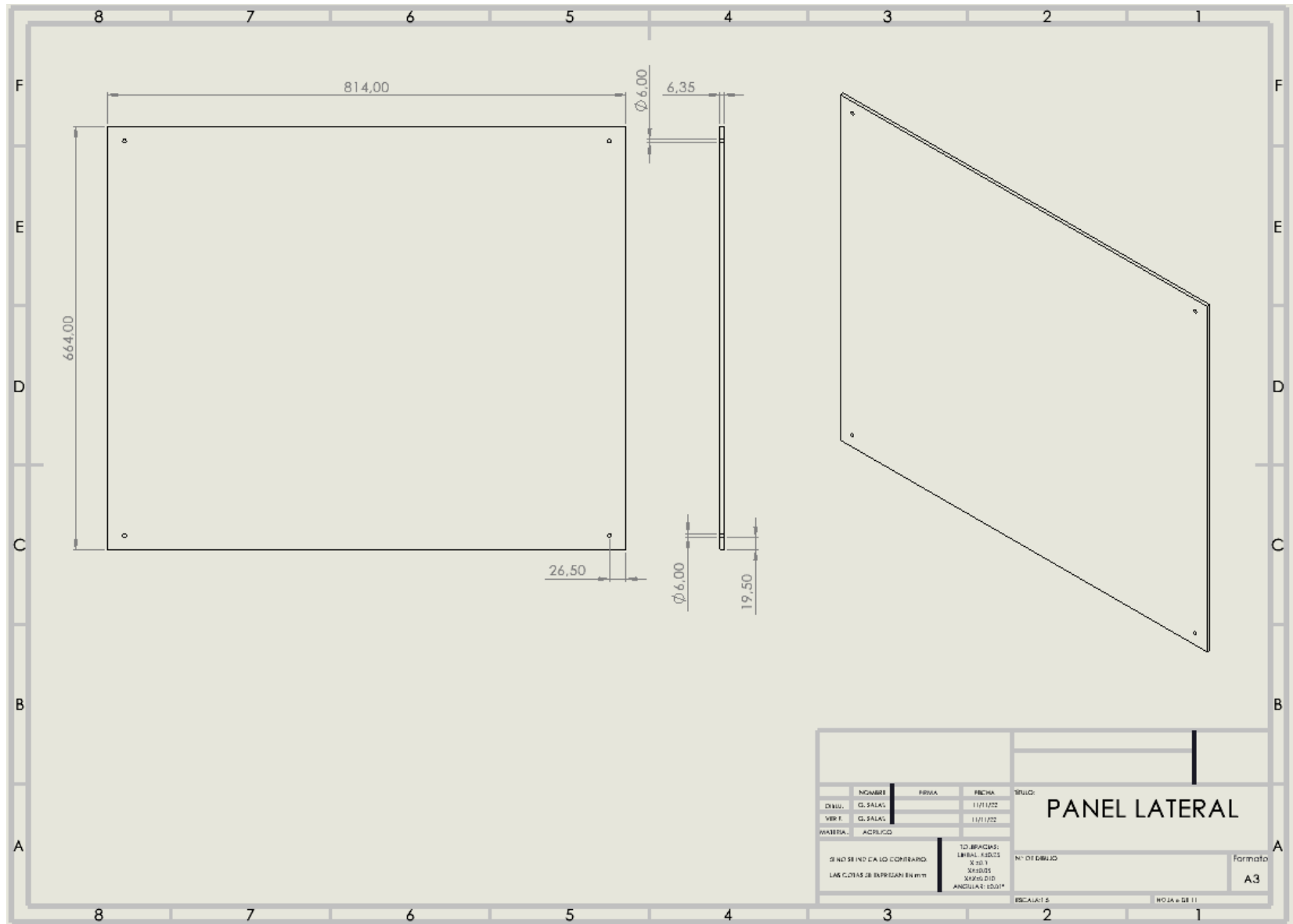
NOMBRE		FECHA	TRUJ:
DIRU. G. SALAS		11/11/22	<b>PERFIL 45X45X850</b>
VER F. G. SALAS		11/11/22	
MATERIA: ALUMINIO 6063			Nº DE DIBUJO
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO. LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		TD. APACIAS: LIBRAL F. BUSTI X.30.1 XX.3003 X.300.010 ANGULARES: 60.01*	Formato <b>A3</b>
		ESCALA: 1:1	HOJA 2 DE 11

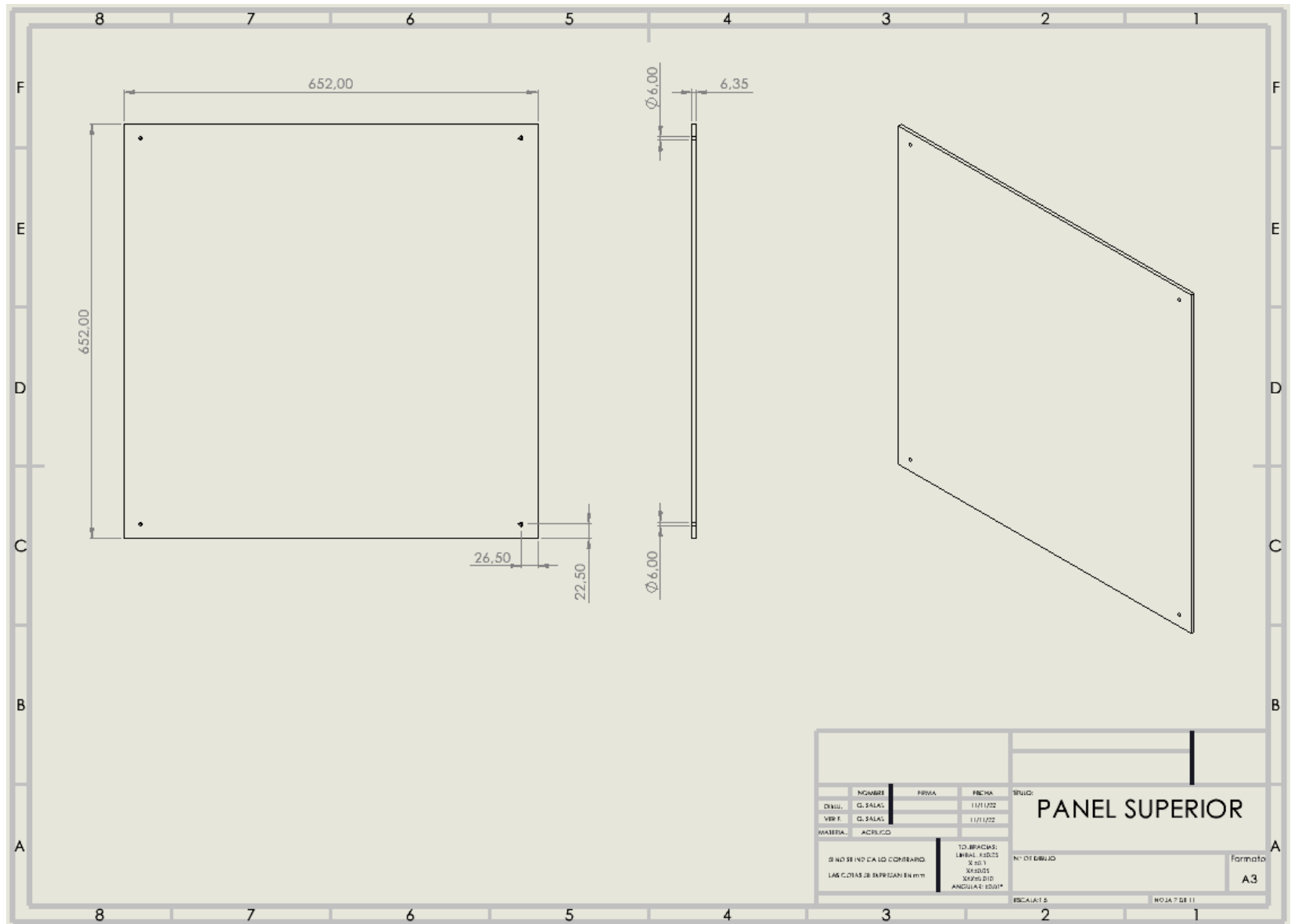


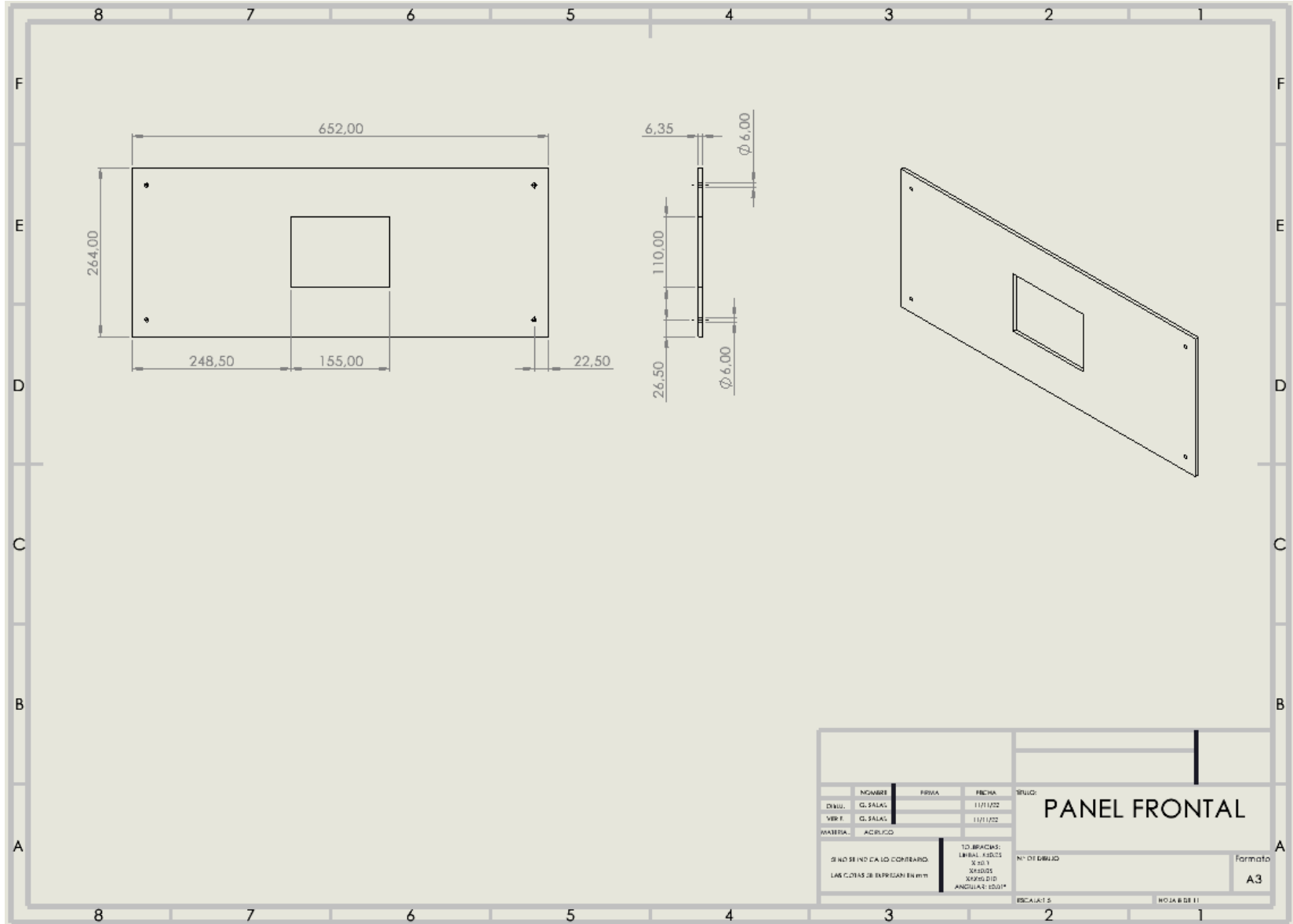
NOMBRE		FECHA	TRUJ:	<b>PERFIL 45X45X200</b>
DIJLJ:	G. SALAS	11/11/22		
VER F:	G. SALAS	11/11/22		
MATERIA: ALUMINIO 6060				
SI NO SE INDICA LO COMBIBO		TOL. BRACAS:		Formato
LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		LINEAL: ±0.05 X 0.1 X 0.05 X 0.05 ANGULOS: ±0.01°		
			Nº DE DIBUJO	A3
			ESCALA: 1	HOJA 9 DE 11



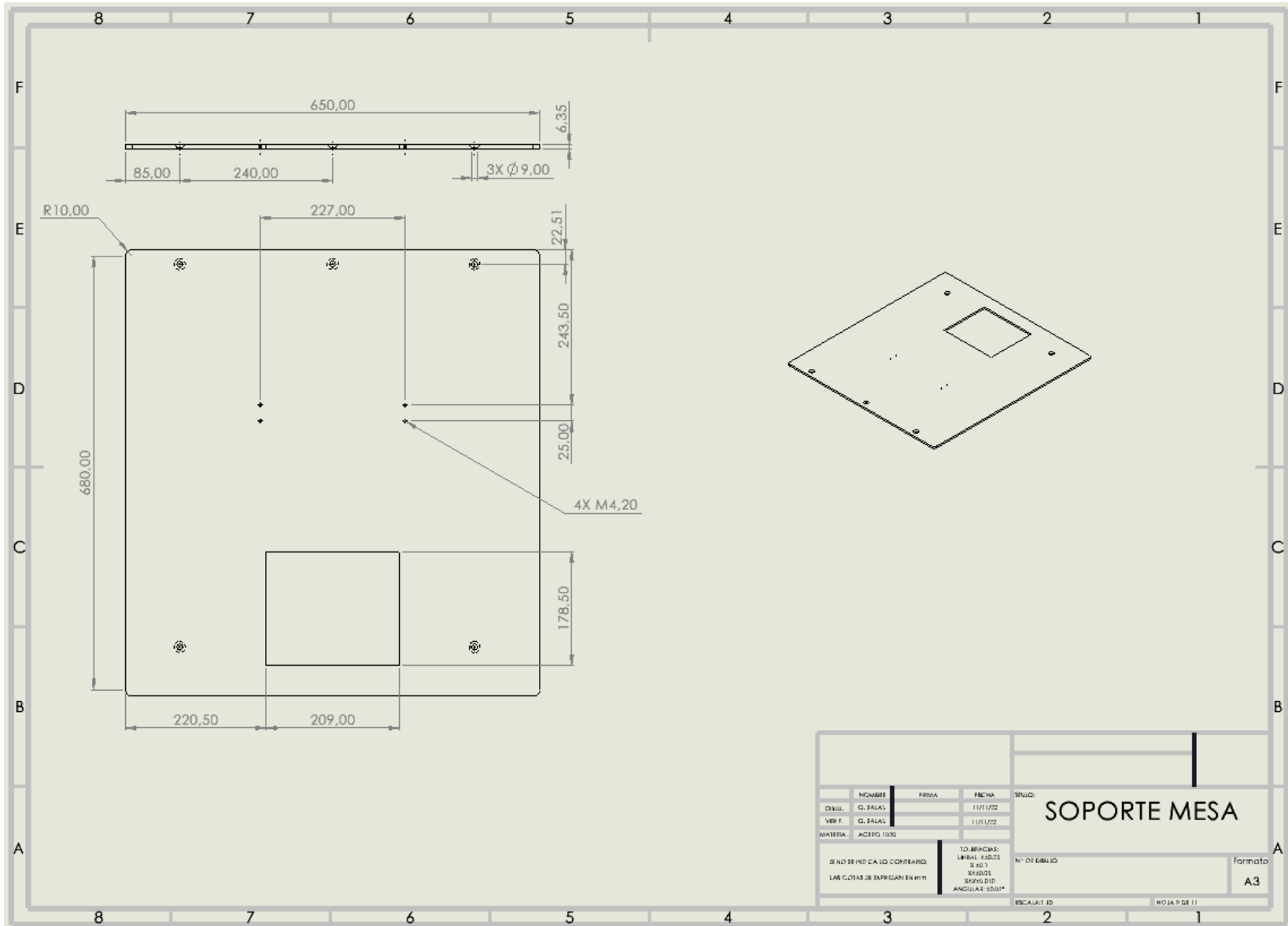


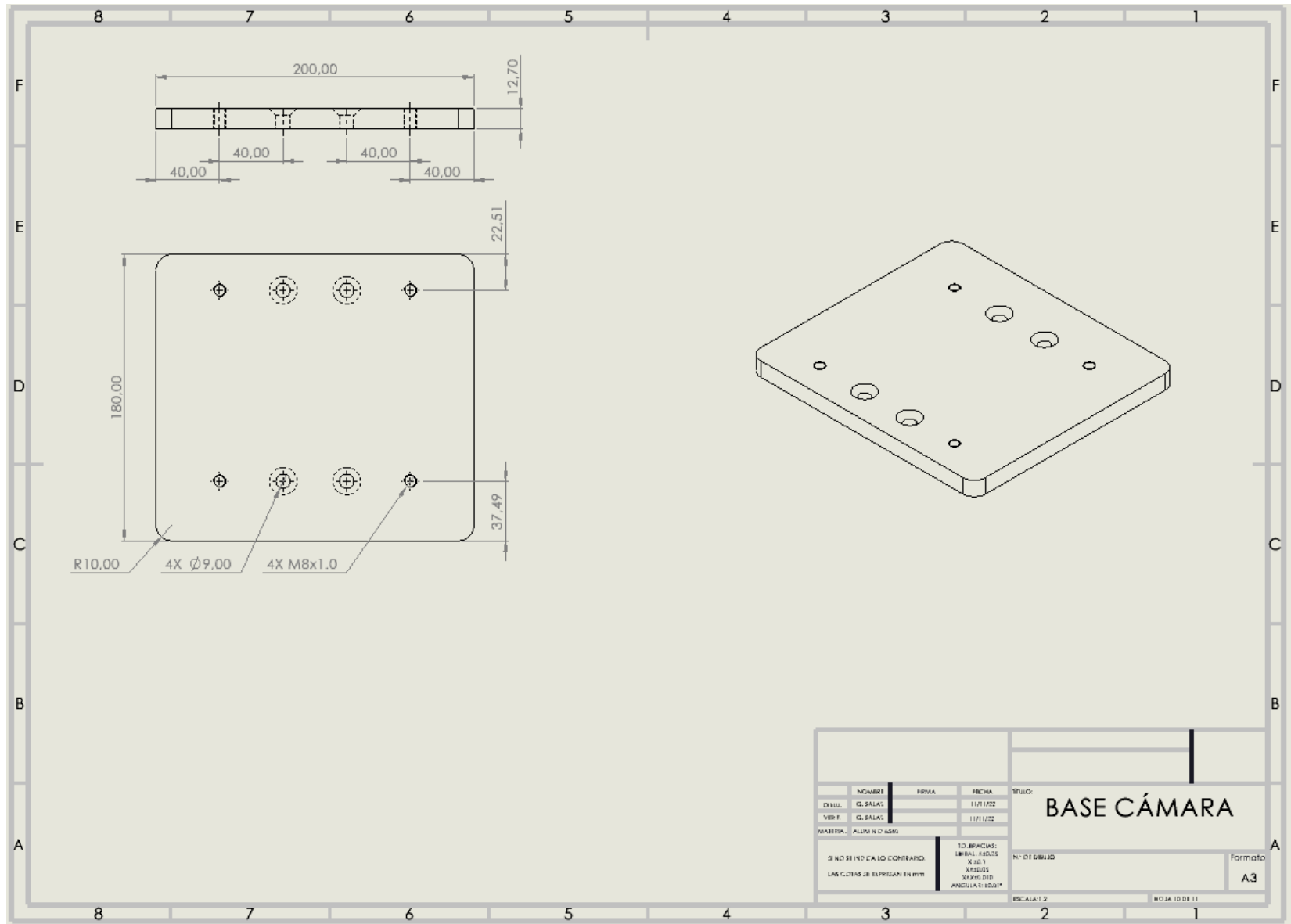


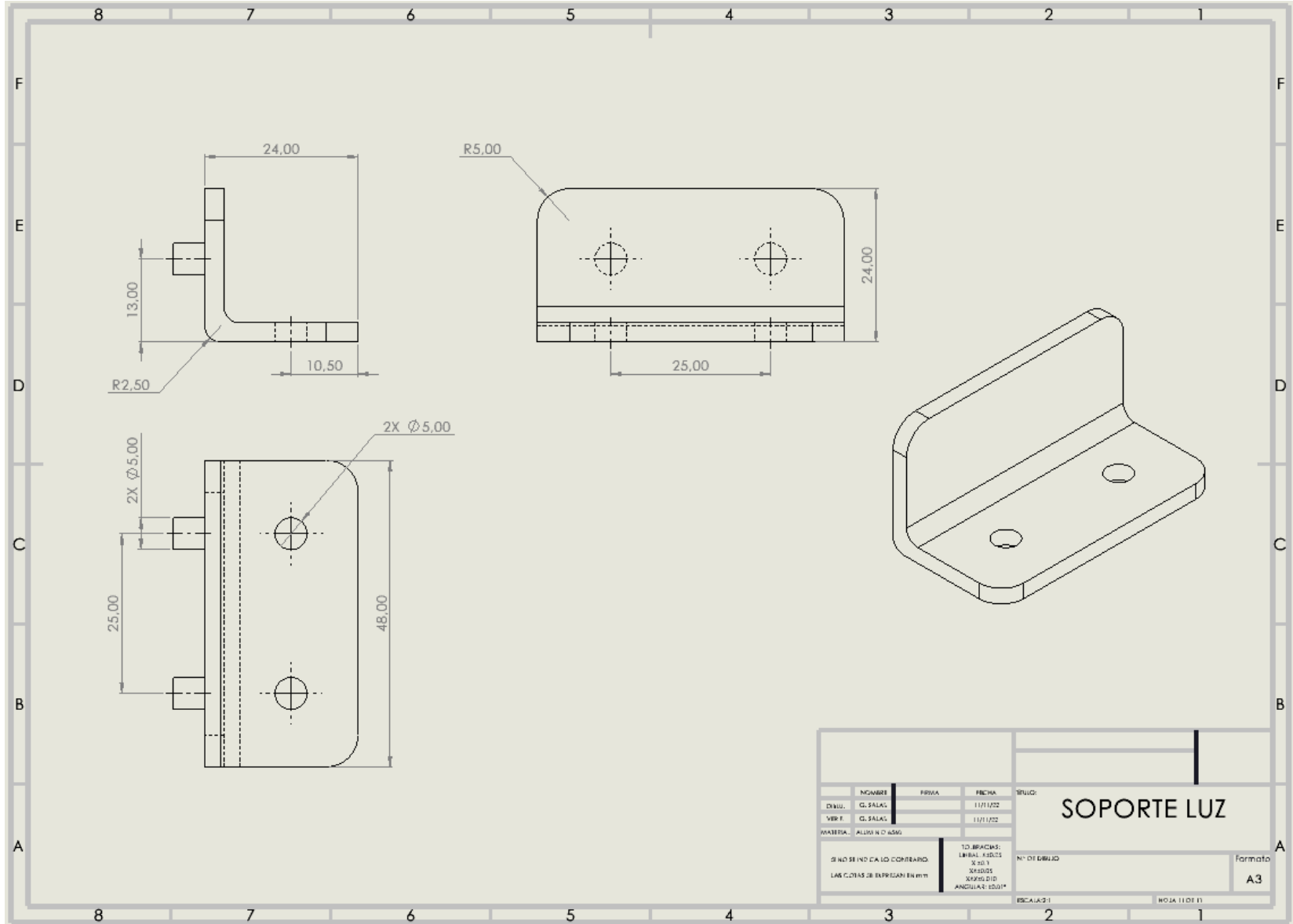




NOMBRE:		PRIMA:	FECHA:	TÍTULO: <b>PANEL FRONTAL</b>
DESU.	Q. SALAS:		11/11/22	
VERE.	Q. SALAS:		11/11/22	
MATERIA:	ACRILICO			
SI NO SE INDICA LO COMBAND.		TOL. BRACIAS:		N.º DE DIBUJO
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		LIBRAL. K30015 X 30.1 X43025 X490.010 ANGULARES: ED01*		
			ESCALA: 1:5	Formato <b>A3</b>
				HOJA B DE 11







Apéndice J. Diagrama eléctrico y de conexiones

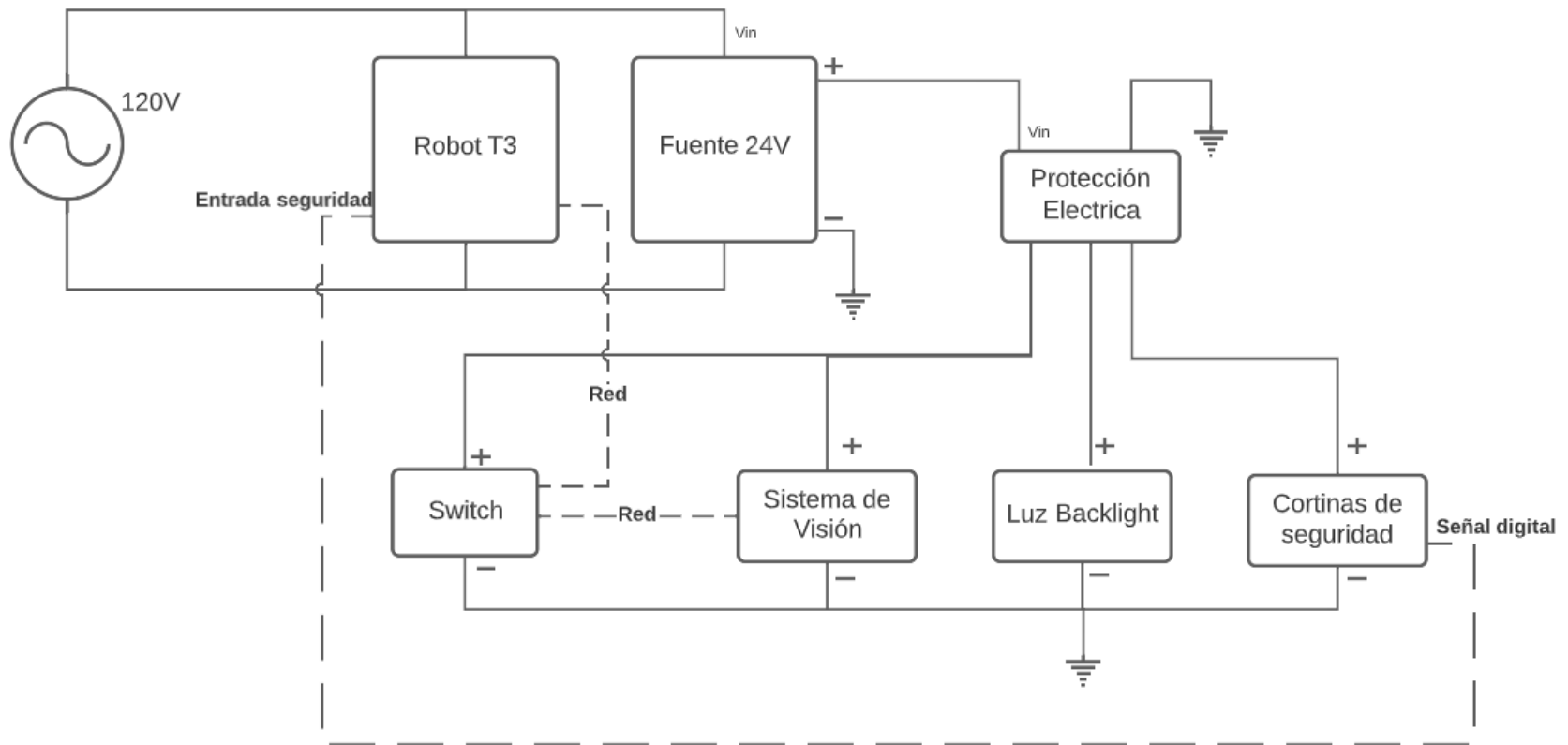


Figura A.33 Diagrama eléctrico de conexiones. Elaboración propia