



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Diseño e implementación de una celda inteligente basada en el trabajo colaborativo de la
repotenciación de 2 robots Scara y sistema de transporte para la clasificación y traslado
de productos mediante visión artificial**

Pérez Alejandro, Carlos Andrés y Reyes Zambrano, Andrés

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

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

Ing. Cortez Pazmiño, Byron Hernán

11 de noviembre de 2022



TESIS PEREZ-REYES v2.0.pdf

Scanned on: 15:57 November 14, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



BYRON BERNAL
CONTEC PLAZA

Identical Words	55
Words with Minor Changes	47
Paraphrased Words	583
Omitted Words	0



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Diseño e implementación de una celda inteligente basada en el trabajo colaborativo de la repotenciación de 2 robots Scara y sistema de transporte para la clasificación y traslado de productos mediante visión artificial"** fue realizado por los señores **Pérez Alejandro , Carlos Andrés y Reyes Zambrano, Andrés** ; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 14 de noviembre de 2022



VERIFICAR AUTENTICIDAD POR
BYRON HERNAN
CORTEZ PAZMINO

Cortez Pazmiño, Byron Hernán

C. C 1714471081



Departamento de Ciencias de la Energía Y Mecánica
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, Pérez Alejandro, Carlos Andrés y Reyes Zambrano, Andrés , con cédulas de ciudadanía n° 1003685136 y 1311457319, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Diseño e implementación de una celda inteligente basada en el trabajo colaborativo de la repotenciación de 2 robots Scara y sistema de transporte para la clasificación y traslado de productos mediante visión artificial" es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 14 noviembre de 2022

Pérez Alejandro, Carlos Andrés

C.C.: 1003685136

Reyes Zambrano, Andrés

C.C.: 1311457319



Departamento De Ciencias de la Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros **Pérez Alejandro, Carlos Andrés y Reyes Zambrano, Andrés** con cédulas de ciudadanía n° 1003685136 y 1311457319, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Diseño e implementación de una celda inteligente basada en el trabajo colaborativo de la repotenciación de 2 robots Scara y sistema de transporte para la clasificación y traslado de productos mediante visión artificial"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 14 noviembre de 2022

Pérez Alejandro, Carlos Andrés

C.C.: 1003685136

Reyes Zambrano, Andrés

C.C.: 1311457319

Dedicatoria

Andrés Pérez

A mis padres Karina Alejandro Burneo y Carlos Pérez Guerra quienes siempre me han brindado su cariño y apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

A mis hermanos Javier y Ariana por estar conmigo y compartir muchos recuerdos.

A mi abuelita Fabiola Burneo por preocuparse siempre por mí.

Andrés Reyes

Dedico este trabajo de titulación a mis padres quienes desde pequeño me han brindado el regalo de la educación, siguiéndome en cada paso que doy para fortalecer mis saberes; también cabe mencionar a mi esposa Cindy Damiana Chávez Saldarriaga e hijo Andrés Reyes Chávez que son pilar fundamental de apoyo para concluir este trabajo e iniciarme en una vida profesional.

Agradecimiento

Andrés Pérez

Agradezco a mis tutores MSc. Byron Hernán Cortez Pazmiño y MSc. David Cesar Loza Matovelle quienes me apoyaron a nivel académico y personal.

A mis amigos Fausto Méndez, Alejandro Pinto, Giss Tibán y Alison Zaldumbide por compartir grandes momentos en esta etapa de mi vida y quienes me tienen mucha paciencia.

Andrés Reyes

Quiero agradecer en primer lugar a Dios quien ha sido mi guía para llegar a una de mis metas como lo es obtener mi título profesional ya que sin Él no podría dar cada paso en esta vida de manera honrada y valerosa; así mismo a mis tutores de la tesis MSc. Byron Hernán Cortez Pazmiño y MSc. David Cesar Loza Matovelle quienes estuvieron en todo el proceso de este trabajo. Por último y no menos importante, a todos quienes conforman mi familia que me han apoyado todos los días.

Índice de Contenido

Certificado	2
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de Contenido.....	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	15
Resumen.....	24
Abstract	25
Capítulo I.....	26
Introducción.....	26
Antecedentes.....	26
Trabajos Preliminares	27
Trabajos Nacionales	27
Diseño, control e implementación de una celda robotizada para clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA.....	27
Diseño y construcción de un robot SCARA que juega damas por medio de visión artificial programado en java	28
Trabajo Internacional	29
Automatización de una Celda Robótica con Retroalimentación Visual	29
Descripción del proyecto.....	30

Justificación e importancia	33
Alcance del proyecto.....	34
Objetivos	34
Objetivo general.....	34
Objetivos específicos	34
Estructura del documento	35
Capítulo II.....	36
Marco Teórico.....	36
Robot SCARA.....	36
Historia.....	36
Características Robot SCARA.....	37
Aplicaciones del robot SCARA en la industria.	39
Cinemática de Robots SCARA	40
Cinemática Directa SCARA.....	41
Cinemática Inversa SCARA.....	43
Volumen de trabajo de SCARA	45
Precisión de Movimientos del SCARA.....	46
Disposición de la celda de trabajo para Robot Industrial	47
Sistemas de Visión Artificial en la celda de manufactura	50
Componentes de una celda con robots cooperativos	52
Implementación de una celda inteligente con arquitectura de robots colaborativos	53

	10
Resumen.....	56
Capítulo III.....	57
Situación actual de la celda inteligente	57
Estado actual de la celda inteligente	57
Recuperación de las piezas mecánicas de la celda inteligente.....	66
Subsistema de giro.....	106
Cálculos de selección.....	111
Métodos y criterios de validación del diseño.....	124
Modelado de las plantas.....	130
Motores para el movimiento angular (Q1, Q2).....	131
Motor lineal del efector final (Q3).....	135
Motor de la mesa rotatoria (Q3).....	137
Conexiones Eléctricas.....	146
Conexión TCP-IP	148
Capítulo IV	151
Identificación y Resultados	151
Pruebas de Funcionamiento	151
CAPÍTULO V.....	191
Conclusiones y Recomendaciones.....	191
Conclusiones	191
Recomendaciones	192

Capítulo VI	194
Referencias bibliográficas	194
Apéndices	195

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Tabla de comparativa de los trabajos realizados e investigados en los antecedentes con la celda inteligente a realizar</i>	32
Tabla 2 <i>Disposiciones de un robot industrial en una celda de trabajo</i>	48
Tabla 3 <i>Ejemplos de trabajos de celdas de manufactura</i>	50
Tabla 4 <i>Inventario técnico / estado actual del robot SCARA 1</i>	59
Tabla 5 <i>Inventario técnico / estado actual del robot SCARA 2</i>	61
Tabla 6 <i>Inventario técnico / estado actual del tablero de control</i>	63
Tabla 7 <i>Acciones a tomar de piezas faltantes</i>	64
Tabla 8 <i>Porcentaje de las acciones realizadas</i>	65
Tabla 9 <i>Requerimientos del usuario para la QFD</i>	83
Tabla 10 <i>Requerimientos técnicos para la QFD</i>	84
Tabla 11 <i>Elementos dentro de la QFD</i>	86
Tabla 12 <i>Elementos dentro de la QFD</i>	86
Tabla 13 <i>Requerimientos técnicos</i>	87
Tabla 14 <i>Subsistemas para el desarrollo del proyecto</i>	88
Tabla 15 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	91
Tabla 16 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	91
Tabla 17 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	92
Tabla 18 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	93
Tabla 19 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	93

Tabla 20 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	94
Tabla 21 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	94
Tabla 22 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	95
Tabla 23 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	96
Tabla 24 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	96
Tabla 25 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	97
Tabla 26 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	98
Tabla 27 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	99
Tabla 28 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	99
Tabla 29 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	100
Tabla 30 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	101
Tabla 31 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	102
Tabla 32 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	102
Tabla 33 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	103
Tabla 34 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	104
Tabla 35 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	105
Tabla 36 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	105
Tabla 37 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	106
Tabla 38 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	107
Tabla 39 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	107
Tabla 40 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	108

Tabla 41 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentada</i>	108
Tabla 42 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 1</i>	109
Tabla 43 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 2</i>	110
Tabla 44 <i>Ventajas y desventajas de la alternativa 3</i>	110
Tabla 45 <i>Matriz de evaluación para las opciones presentadas</i>	111
Tabla 46 <i>Descripción del producto</i>	129
Tabla 47 <i>Tabla resumen de los datos obtenidos</i>	141
Tabla 48 <i>Orden que se recolectaron las mediciones para los diferentes valores de ángulo para los grados de libertad Q1 y Q2</i>	152
Tabla 49 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	153
Tabla 50 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	154
Tabla 51 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	155
Tabla 52 <i>Valores descriptivos que presentan errores absolutos obtenidos para los dos grados de libertad Q1 y Q2</i>	156
Tabla 53 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	175
Tabla 54 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	176
Tabla 55 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	177
Tabla 56 <i>Tabla de recolección de datos para muestreo</i>	178
Tabla 57 <i>Tabla resumen de la matriz de observación</i>	185
Tabla 58 <i>Tabla de errores de clasificación.</i>	186
Tabla 59 <i>Tabla resumen de la matriz de observación</i>	188

Índice de figuras

Figura 1 <i>Trabajo de celda de manufactura realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE</i>	28
Figura 2 <i>Implementación del entorno para visión artificial</i>	29
Figura 3 <i>Robots SCARA usado para el pick and place de piezas</i>	30
Figura 4 <i>Layout de la celda inteligente a implementar</i>	31
Figura 5 <i>Figura de la composición de un manipulador robótico tipo SCARA</i>	37
Figura 6 <i>Articulaciones de un robot tipo Scara</i>	38
Figura 7 <i>Definición del volumen de trabajo de un robot tipo SCARA tipo RRP</i>	39
Figura 8 <i>Aplicación del robot tipo SCARA</i>	40
Figura 9 <i>Cinemática de un manipulador robótico</i>	41
Figura 10 <i>Ilustración de los parámetros geométricos del robot SCARA</i>	42
Figura 11 <i>Desacople cinemático de un robot SCARA</i>	42
Figura 12 <i>Cinemática inversa de un manipulador</i>	43
Figura 13 <i>Desacople cinemático de un robot SCARA</i>	44
Figura 14 <i>Desacople cinemático de un robot SCARA</i>	44
Figura 15 <i>Desacople cinemático de un robot SCARA</i>	45
Figura 16 <i>Volumen de trabajo SCARA</i>	46
Figura 17 <i>Robot en una celda de manufactura</i>	49
Figura 18 <i>Aspectos que se toman en cuenta para la implementación de un robot en una celda de trabajo</i>	49

Figura 19 <i>Análisis de procesos</i>	51
Figura 20 <i>Aplicaciones de robots manipuladores</i>	51
Figura 21 <i>Aplicaciones de robots manipuladores</i>	52
Figura 22 <i>Topología física de un robot</i>	53
Figura 23 <i>Línea ensamble de autos</i>	54
Figura 24 <i>Celda inteligente</i>	57
Figura 25 <i>Partes principales Robot Scara 1</i>	58
Figura 26 <i>Partes principales Robot Scara 2</i>	60
Figura 27 <i>Tablero de control implementado</i>	62
Figura 28 <i>Diagrama de flujo de trabajo</i>	66
Figura 29 <i>Diagrama de flujo de trabajo</i>	67
Figura 30 <i>Estado inicial y final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa</i>	68
Figura 31 <i>Estado inicial y final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa</i>	68
Figura 32 <i>Estado inicial y final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa</i>	69
Figura 33 <i>Diagrama de flujo con las actividades que se realizaron para la recuperación del electroimán</i>	70
Figura 34 <i>Antes y el después del reemplazo de la pieza</i>	71
Figura 35 <i>Diagrama de flujo con las actividades que se realizaron para el diseño de un nuevo acople en impresión 3D</i>	72

Figura 36 <i>Estado inicial del acople de motor lineal SCARA 1</i>	73
Figura 37 <i>Estado final del acople de motor lineal SCARA 1</i>	73
Figura 38 <i>Estado inicial del acople de motor lineal SCARA 2</i>	74
Figura 39 <i>Estado final del acople de motor lineal SCARA 2</i>	74
Figura 40 <i>Diagrama de flujo con las actividades realizadas en la placa del soporte lineal</i>	75
Figura 41 <i>Antes y después de la pieza aplicando las actividades descritas en el</i> <i>diagrama de flujo para su recuperación</i>	76
Figura 42 <i>Antes y después de la pieza aplicando las actividades descritas en el</i> <i>diagrama de flujo para su recuperación</i>	76
Figura 43 <i>Diagrama de flujo donde se refleja las actividades realizadas para la</i> <i>recuperación de la pieza</i>	77
Figura 44 <i>La placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos</i> <i>en el diagrama de flujo</i>	78
Figura 45 <i>La placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos</i> <i>en el diagrama de flujo</i>	78
Figura 46 <i>La placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos</i> <i>en el diagrama de flujo</i>	79
Figura 47 <i>Actividades realizadas para el acople soporte motor base</i>	80
Figura 48 <i>El antes de la pieza</i>	80
Figura 49 <i>El después de la pieza</i>	81

Figura 50 <i>Actividades realizadas en un diagrama de flujo para el soporte potenciómetro brazo 2</i>	81
Figura 51 <i>Actividades realizadas en un diagrama de flujo para el soporte potenciómetro brazo 2</i>	82
Figura 52 <i>Despliegue de la Función de Calidad QFD</i>	85
Figura 53 <i>Requerimientos para cada subsistema del sistema de transporte</i>	90
Figura 54 <i>Sistema dispensadora de alimento</i>	112
Figura 55 <i>Acople de aluminio</i>	113
Figura 56 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el acople</i>	114
Figura 57 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el acople</i>	114
Figura 58 <i>Análisis de deformaciones en el acople</i>	115
Figura 59 <i>Medidas de base de MDF</i>	116
Figura 60 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la base</i>	116
Figura 61 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la base</i>	117
Figura 62 <i>Análisis de desplazamiento en la base</i>	117
Figura 63 <i>Medidas de estructura de soporte</i>	118
Figura 64 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la estructura</i>	119
Figura 65 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la estructura</i>	119
Figura 66 <i>Análisis de desplazamientos en la estructura</i>	120
Figura 67 <i>Medidas de contenedor</i>	121
Figura 68 <i>Medidas del bastidor</i>	121

Figura 69 <i>Medidas del bastidor</i>	122
Figura 70 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el bastidor</i>	122
Figura 71 <i>Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el bastidor</i>	123
Figura 72 <i>Análisis de desplazamientos en el bastidor</i>	123
Figura 73 <i>Método de validación de acople del sistema de dispensación con los parámetros de mallado adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos para convergencia con su respectivo mallado</i>	124
Figura 74 <i>Resultado de la convergencia del método adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos del acople</i>	125
Figura 75 <i>Método de validación del brazo de alimentación del sistema de dispensación con los parámetros de mallado adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos para convergencia con su respectivo mallado</i>	125
Figura 76 <i>Resultado de la convergencia del método adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos del brazo de alimentación del sistema de dispensación</i> ..	126
Figura 77 <i>Método de validación de la mesa del sistema de dispensación con los parámetros de mallado adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos para convergencia con su respectivo mallado</i>	126
Figura 78 <i>Resultado de la convergencia del método adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos de la mesa del sistema de dispensación</i>	127
Figura 79 <i>Detalle de análisis</i>	128
Figura 80 <i>Motor BOCH Características técnicas</i>	130
Figura 81 <i>Ingreso de datos tomados y filtrados por ident</i>	131
Figura 82 <i>Curva característica</i>	132

Figura 83	<i>Representación de repuesta de escalón</i>	133
Figura 84	<i>Curva característica</i>	134
Figura 85	<i>Representación de repuesta de escalón</i>	134
Figura 86	<i>Ingreso de datos tomados y filtrados por ident</i>	135
Figura 87	<i>Curva característica</i>	136
Figura 88	<i>Representación de repuesta de escalón</i>	137
Figura 89	<i>Ingreso de datos tomados y filtrados</i>	138
Figura 90	<i>Salida del Modelamiento</i>	139
Figura 91	<i>Representación de repuesta de escalón</i>	140
Figura 92	<i>Motor Q1</i>	141
Figura 93	<i>Representación del lazo abierto de Q1</i>	142
Figura 94	<i>Motor Q2</i>	142
Figura 95	<i>Representación del lazo abierto de Q2</i>	143
Figura 96	<i>Motor Q3</i>	144
Figura 97	<i>Representación del lazo abierto de Q3</i>	144
Figura 98	<i>Motor Banda y base giratoria</i>	145
Figura 99	<i>Representación del lazo abierto de motor de banda</i>	145
Figura 100	<i>Diagrama unifilar de los robots SCARAs</i>	146
Figura 101	<i>Esquema de la banda transportadora</i>	147
Figura 102	<i>Diagrama unifilar del sistema dispensador</i>	147
Figura 103	<i>Esquema de configuraciones de red</i>	148

Figura 104 <i>Esquema de nodos creados una vez conectado el TCP en las ESP32 y el Servidor de ROS</i>	149
Figura 105 <i>Esquema de nodos para el proceso</i>	149
Figura 106 <i>Esquema de nodos para el proceso</i>	150
Figura 107 <i>Histograma de los valores del error absoluto del ángulo Q1</i>	156
Figura 108 <i>Histograma de los valores del error absoluto del ángulo Q2</i>	157
Figura 109 <i>Gráfica de caja de error absoluto del ángulo Q1</i>	158
Figura 110 <i>Gráfica de caja de error absoluto del ángulo Q2</i>	158
Figura 111 <i>Gráfica de dispersión del Error porcentual vs. Ángulo teórico Q1</i>	159
Figura 112 <i>Gráfica de dispersión del Error porcentual vs. Ángulo teórico Q2</i>	160
Figura 113 <i>Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner del error absoluto del ángulo Q1</i>	161
Figura 114 <i>Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner del error absoluto del ángulo Q2</i>	161
Figura 115 <i>Histograma de la precisión del ángulo Q1</i>	162
Figura 116 <i>Histograma de la precisión del ángulo Q2</i>	163
Figura 117 <i>Gráfica de caja precisión de los ángulos Q1 y Q2</i>	164
Figura 118 <i>Gráfica de dispersión de Precisión vs. Ángulo Q1</i>	165
Figura 119 <i>Gráfica de dispersión de Precisión vs. Ángulo Q2</i>	165
Figura 120 <i>Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner de la precisión del ángulo Q1</i>	166

Figura 121 <i>Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner de la precisión del ángulo Q2</i>	167
Figura 122 <i>Histograma de los valores del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i>	168
Figura 123 <i>Gráfica de caja del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i> ...	169
Figura 124 <i>Histograma de los valores del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i>	169
Figura 125 <i>Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i>	170
Figura 126 <i>Histograma de los valores de precisión la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i>	171
Figura 127 <i>Gráfica de caja de la precisión de la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i> ...	172
Figura 128 <i>Gráfica de dispersión de Precisión vs. Ángulo teórico de la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i>	173
Figura 129 <i>Gráfica de la prueba de normalidad de la precisión de la secuencia de los ángulos Q1 y Q2</i>	174
Figura 130 <i>Histograma del error porcentual de los ángulos de la combinación Q1 y Q2</i>	179
Figura 131 <i>Gráfica de caja del error porcentual de los ángulos de la combinación Q1 y Q2</i>	180
Figura 132 <i>Gráfica de la prueba de normalidad del error porcentual de los ángulos de la combinación Q1 y Q2</i>	181
Figura 133 <i>Histograma de la precisión de los ángulos de la combinación Q1 y Q2</i>	182

Figura 134 <i>Gráfica de caja de la precisión de los ángulos de la combinación Q1 y Q2</i>	183
Figura 135 <i>Gráfica de la prueba de normalidad de la precisión de los ángulos de la combinación Q1 y Q2.....</i>	183
Figura 136 <i>Reconocimiento de piezas roja y azules en un fondo negro</i>	184
Figura 137 <i>Recorte del área de trabajo en un fondo claro</i>	184
Figura 138 <i>Histograma de la precisión de las piezas recogidas.....</i>	188
Figura 139 <i>Gráfica de caja de precisión de las piezas recogidas.....</i>	189
Figura 140 <i>Gráfica de la prueba de normalidad de la precisión de las piezas recogidas</i>	189

Resumen

En el documento se detalla, la repotenciación de los elementos de una celda inteligente e implementación de un sistema dispensador de material, para clasificar productos mediante el trabajo de dos robots SCARA.

El objetivo de aplicar el trabajo colaborativo entre dos manipuladores es; mejorar la producción en un determinado proceso industrial, tener la capacidad de flexibilidad al posiciona cada uno de los elementos, realizar correcciones de los errores individuales y en conjunto.

En el primer y segundo capítulo se describe los elementos que conforman una celda, las características que deben poseer para realizar trabajo colaborativo, los trabajos preliminares internacionales y nacionales que se obtuvieron en la investigación.

En el tercer y cuarto capítulo se desarrolla la QFD (Casa de Calidad), tablas de análisis y factibilidad de selección de materiales, el análisis del estado de los elementos, caracterización de las plantas, cálculos, simulación para la selección de materiales y el respectivo análisis estadístico de los resultados obtenidos.

En el último capítulo, se redactan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del proyecto del cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados. Además. el trabajo se realizó a través en el ambiente ROS (Robotics Operating System) con nodos publicadores y suscriptores, con el fin de monitorear y controlar el proceso a través de una HMI.

Palabras clave: celda inteligente, repotenciación, trabajo colaborativo, ROS, robots

Abstract

The document talks about the repowering of the elements in an intelligent cell and the implementation of system that dispend material for the classification of products through the work of two SCARA robots.

The main objective of applying collaborative work between two manipulators, is the improvement of production into industrial process, have the capacity to be flexible with each position of the elements in the cell, have the capacity for flexibility when positioning each one of the elements make corrections of individual and ensemble errors.

The first and second chapters describe the elements that make up a cell, the characteristics that they must have to carry out a collaborative work, the international and national preliminary works that will be acquired in the investigation.

In the third and fourth chapter the QFD (Quality House) is developed, analysis tables and feasibility of selection of materials, the analysis of the state of the elements, characterization of the plants, calculations and simulation for the selection of materials and the respective statistical analysis of the results obtained.

In the last chapter, the conclusions and recommendations were written from result of the project for the fulfillment of each of the proposed objectives are drawn up. Also. The work was carried out through the ROS environment (Robotics Operating System) with publisher and subscriber nodes, in order to monitor and control the process through an HMI.

Key words: smart cell, repowering, collaborative work, ROS, robots

Capítulo I

Introducción

El primer capítulo, presenta los antecedentes relacionados al campo de los robots dentro de la celda inteligente, principales aplicaciones, trabajos preliminares; a nivel nacional e internacional, la descripción del proyecto y la justificación de la importancia que tiene. Para ello, finalmente, hablar de la naturaleza del proyecto, su alcance y objetivos.

Antecedentes

La aplicación de robots está enfocada en realizar cualquier actividad que el ser humano es capaz de hacer. En la actualidad se ha experimentado un auge en el campo de la industria de manufactura debido a los aumentos de demanda de producción que justificaban las inversiones.

Las aplicaciones más comunes de robots industriales son actualmente:

- Manipulación de piezas, que incluyen el proceso de transferencia continua de piezas, partes o elementos y su transporte, disposición o ubicación, entre las que podemos encontrar:
- Ensamblado o montaje de piezas (posicionamiento, embutición, atornillado).
- Empaquetado, embalaje o picking (selección de piezas, disposición en cajas, embalajes).
- Paletizado y transferencia de pallets (disposición de piezas o cajas en pallets y desplazamientos).
- Alimentación de máquinas (piezas, herramientas).

En el estudio de (Ocampo, 2019) se indica que una celda de manufactura es un mecanismo que coordina eficazmente la fabricación de partes, piezas o productos. Estas

son utilizadas en su mayoría por empresas cuyo flujo de producción es alto y variado. Una ventaja es poder funcionar largos periodos de producción sin que el operario supervise el proceso debido a la tecnología implementada; otra ventaja es que la celda de manufactura puede ser flexibles, lo que significa que puede procesar varios productos con la capacidad de realizar modificaciones, lo cual permite adecuar el proceso a nuevas exigencias o necesidades del mercado.

Trabajos Preliminares

Trabajos Nacionales

Diseño, control e implementación de una celda robotizada para clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA

En el trabajo de (Córdova & Quimbiamba, 2018) se diseñó e implementó una celda robotizada para la clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA para aumentar la producción en un determinado proceso industrial. Primero se diseñó cada elemento de la celda para su posterior construcción, luego se ejecutó las pruebas necesarias para constatar el funcionamiento adecuado de la misma. A continuación, se aplicó el filtro de Kalman en la celda como predictor de posición. Finalmente, se programó todo el proceso a través de nodos en el ambiente ROS (Robotics Operating System) con el fin de poder monitorear cada uno de ellos. Adicionalmente, se realizó un análisis de ventajas al aplicar trabajo colaborativo en una estación robotizada, mediante el cálculo de producción y rendimiento general de la celda antes y después de instalar un segundo robot como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Trabajo de celda de manufactura realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



Nota. Tomada por Córdova y Quimbiamba (2018).

Diseño y construcción de un robot SCARA que juega damas por medio de visión artificial programado en java

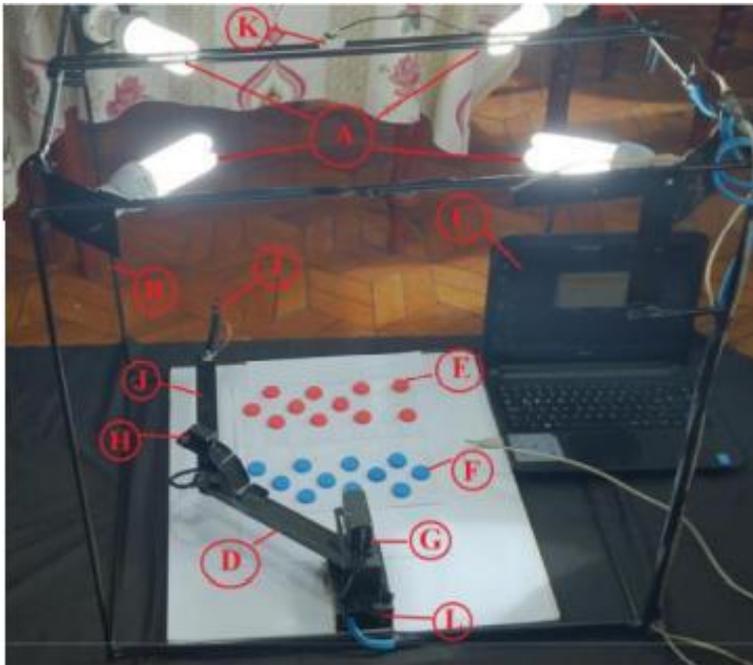
El trabajo de investigación de (Changoluisa, 2014) se diseñó y construyó un brazo robótico industrial tipo SCARA, el cual puede jugar damas contra un oponente humano. Para lo cual se combinó tres áreas tecnológicas:

- Visión por computadora para la captura de los movimientos que el contrincante realice sobre el tablero de damas.
- Inteligencia artificial para la implementación de un algoritmo de búsqueda, para determinar la mejor jugada.
- Diseño y construcción de un brazo robótico se determinará dependiendo de los movimientos de las fichas dentro del tablero de damas.

En la Figura 2 nos muestra la identificación de cada uno de los componentes de la aplicación del robot SCARA.

Figura 2

Implementación del entorno para visión artificial



Nota. Tomada por Changoluisa (2014).

Trabajo Internacional

Automatización de una Celda Robótica con Retroalimentación Visual

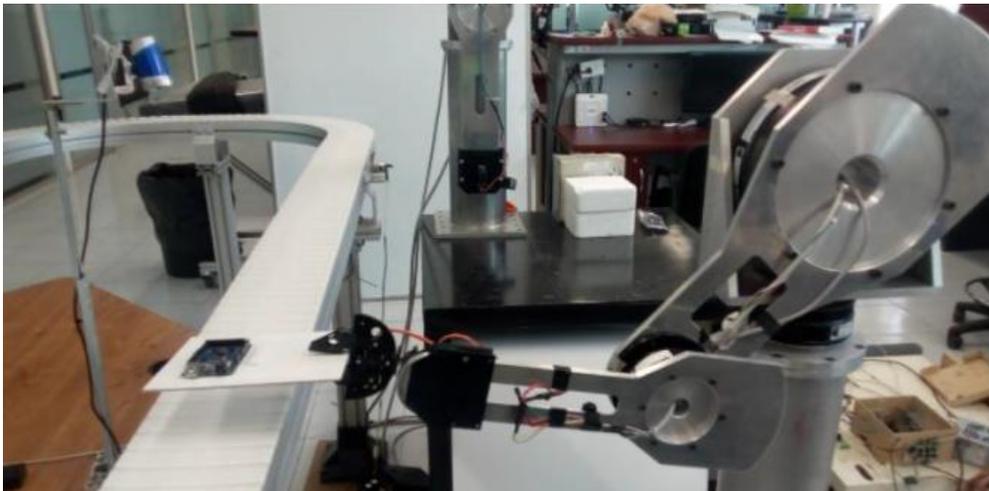
En la tesis de (Mayoral, 2017) se realizó el diseño e instrumentación de una celda robótica la cual estaba conformada por: una banda transportadora, dos brazos robóticos de transmisión directa (ROTRADI's), un sistema de adquisición de datos y una cámara web. La celda robótica se implementó para identificar tarjetas electrónicas usando algoritmos de aprendizaje automático mediante una tarjeta Arduino Mega para el control de posición de la banda transportadora y la tarjeta Arduino Due para el control de los robots. Además, se

desarrolló el procesamiento digital de imágenes en conjunto con los algoritmos de aprendizaje automático, como parte del reconocimiento de las tarjetas electrónicas y la identificación de componentes.

Adicionalmente, se desarrollaron los algoritmos de control de posición de cada robot; se implementó la tecnología Wifi para establecer la comunicación hacia una página de internet para la transmisión de datos de la celda. La integración del sistema se realizó por medio de una interfaz gráfica en MATLAB.

Figura 3

Robots SCARA usado para el pick and place de piezas



Nota. Tomada por Mayoral (2017).

Descripción del proyecto

El siguiente trabajo, es la continuación del proyecto de Córdova y Quimbiamba (2018) implementado en la universidad, donde se diseñó y construyó un robot SCARA, una banda transportadora y se usó visión artificial para emular una celda robotizada. La principal función de la celda era la clasificación de materiales mediante el proceso Pick and Place.

Como se muestra en la figura 4, la nueva celda inteligente, tiene el diseño e implementación de un sistema de alimentación con sensores de presencia para la detección de material, un sistema clasificación que reconoce, clasifica y selecciona el material por color, un sistema de pick and place para colocar elementos en la banda transportadora para luego ubicarlo respectivo lugar de la mesa de trabajo. Además, el proceso será monitoreado por una estación de trabajo con HMI usando los protocolos de comunicación TCP-IP.

Figura 4

Layout de la celda inteligente a implementar



Nota. Realizada en FACTORY IO (s.f.).

En el estudio de los antecedentes, se pudo constatar que, ningún trabajo tenía un sistema de alimentación, que la mayoría usa robots tipo SCARAs para el proceso de pick and place, que se usa una banda transportadora para el desplazamiento del material de un punto a otro, de igual manera, que cada uno usa visión artificial para el proceso, pero con aplicaciones diferentes. Por último, que solo la tesis de Córdova y Quimbiamba (2018) no posee una base de datos.

Tomando en cuenta todas las características mencionadas se elaboró la tabla 1 donde se muestra la comparación de cada uno de los trabajos dependiendo sus características.

Tabla 1

Tabla de comparativa de los trabajo realizados e investigados en los antecedentes con la celda inteligente a realizar

Elemento	Sistema de alimentación	Tipo de robot industrial	Cinta transportadora	Visión artificial	Programación ROS	Base de datos
Tesis						
Córdova & Quimbiamba	No	SCARA	Si	Si	Si	No
Tesis						
Changoluisa	No	SCARA	No	Si	Si	Si
Tesis						
Mayoral	No	ROTRADI	No	Si	No	Si
Trabajo						
Propuesto	Si	SCARA	Si	Si	Si	Si

Nota. Cuadro resumen de las investigaciones realizadas

En conclusión, la celda inteligente es la recopilación de todos los trabajos anteriores y la integración de un sistema de alimentación, un sistema de visión artificial más robusto, un rediseño de los controladores, un sistema de comunicación TCP-IP, la repotenciación de los circuitos eléctricos e implementación de una estación de trabajo con una HMI normada según la ISA 101.

Justificación e importancia

De acuerdo a los estudios realizados por (Cardenas & Campuzano, 2019), (Cuauhtémoc, 2018), (Morillo & Sosa, 2017), (Ansoategui, 2017) se encontró que el problema principal, es la búsqueda de sistemas multiprocesos con integración óptima de sus elementos, la cual no se lleva cabo debido a las diferentes características de los equipos y la pobre comunicación que existe entre ellos. Además, en el país la mayoría de empresas de manufactura tienen sistemas cerrados, los que requieren de mano de obra especializada para su operación y mantenimiento, por lo que incrementa el valor de producción, mano de obra local y valor final del producto. Dando como consecuencia el no poder competir con empresas internacionales por el costo, calidad e innovación.

Por lo tanto, el problema que se desea resolver es debido que, al existir una celda de manufactura en la universidad, ésta sea capaz realizar procesos similares a la industria, con tecnología abierta, además, esta contará con un diseño modular y amigable con el usuario, con el propósito de ayudar a los estudiantes a adquirir la experiencia necesaria.

Por tal razón, la integración una celda inteligente con tecnología nacional, permitirá una estructura flexible; la cual integrará una arquitectura abierta para un aprendizaje técnico de mejor calidad, desarrollo de nuevas tecnologías, conocimiento y gestión de procesos industriales. También, servirá para una mejor preparación tanto académica como profesional, debido a que, al comenzar a utilizar este nuevo tipo de tecnologías, los estudiantes serán capaz de replicar o implementar los conocimientos adquiridos a nuevos sistemas, mecanismo dentro de empresas nacionales.

Alcance del proyecto

Para la celda inteligente, se tomó como base los mecanismos elaborados, además, se realizó el análisis del estado de los elementos, donde se aplicó rediseño, repotenciación, reacondicionamiento de los elementos que se necesitaban para el correcto funcionamiento.

El trabajo realizado, es el compendio de la repotenciación de dos robots SCARAs, el reacondicionamiento de la banda transportadora, la construcción de un sistema dispensador de material capaz de saber cuándo tiene materia prima, la implementación de una estación de control, el diseño e instalación tablero de control para los circuitos de potencia, control y fuentes de alimentación, además de la inclusión de sensores y visión artificial para controlar los parámetros de entrada y salida de la celda. El diseño de la celda es modular para poder realizar cambios.

Las limitaciones de la celda van a ser dadas por la velocidad de trabajo, protocolos de comunicación de los elementos, por la capacidad máxima de almacenamiento, normativas de trabajo y espacio de trabajo que se tenga.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar una celda inteligente basada en el trabajo colaborativo de la repotenciación 2 robots SCARA y sistema de transporte para clasificar y trasladar productos mediante visión artificial.

Objetivos específicos

- Evaluar el estado general los robots SCARAs y la banda transportadora.
- Rediseñar el control del actuador del sistema de transporte.
- Diseñar e implementar el sistema de alimentación de productos al proceso.

- Implementar el sistema de visión artificial para realizar el proceso de clasificación de piezas.
- Diseñar e implementar una interfaz HMI basado en la norma ISA 101.
- Realizar las debidas pruebas del proceso de clasificación de piezas por color de manera continua.
- Implementar una base de datos para llevar un registro de la producción.

Estructura del documento

El documento tiene cinco capítulos: el primer capítulo se desarrolla la descripción, justificación, objetivos, antecedentes, trabajos preliminares locales e internacionales del proyecto.

El segundo capítulo está conformado por el marco teórico del proyecto, en que se detalla la definiciones básicas y específicas de los componentes que formara parte del proyecto.

En el tercer capítulo, se detalla la evaluación del estado de los componentes y el diseño con metodología QDF para la implementación de un sistema dispensador de material.

En el cuarto capítulo, está la construcción del sistema dispensador de material, caracterización de los motores y como último punto el análisis de los resultados obtenidos.

El quinto capítulo, se realizan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron del proyecto realizado.

Capítulo II

Marco Teórico

El segundo capítulo, presenta la investigación de los manipuladores robóticos industriales; la definición, clasificación y aplicaciones, la descripción de la cinemática del robot SCARA, criterios de selección y campos de aplicación, descripción de la celda de trabajo robotizada, elementos, criterios de implementación.

Finalmente, se describe sobre la robótica colaborativa, aplicación en la industria y su implementación.

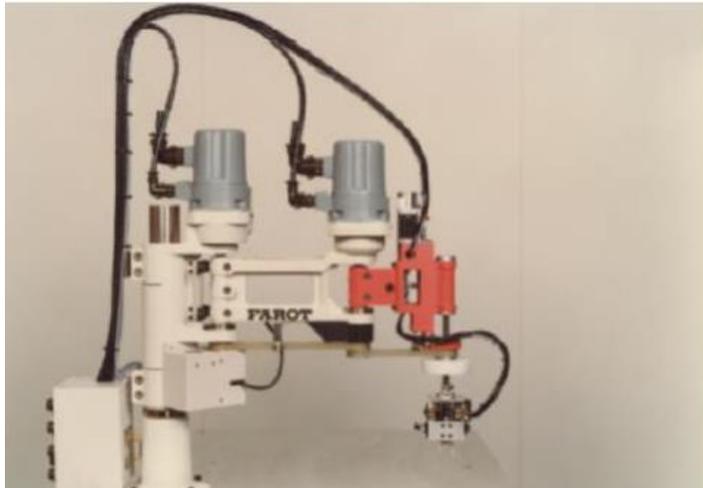
Robot SCARA

Historia

El robot industrial tipo SCARA fue desarrollado en 1978 en Japón bajo la propuesta del profesor Hiroshi Makino en la universidad de Yamanashi, el resultado del desarrollo se muestra en la Figura 6. El acrónimo SCARA viene de Selective Compliance Assembly Robot Arm, es decir, brazo robótico con conformidad selectiva. El término compliance hace referencia a la poca rigidez horizontal que presenta esta configuración, en contraste con su alta rigidez vertical.

Figura 5

Figura de la composición de un manipulador robótico tipo SCARA.



Nota. Tomada por Astudillo (2020).

La principal característica, de un robot manipulador es: la precisión a alta velocidad, la cual se usa en las líneas de producción como: la paletización, el ensamblaje, la soldadura de circuitos, posicionamiento de componentes, perforación, entre otras (Astudillo, 2020).

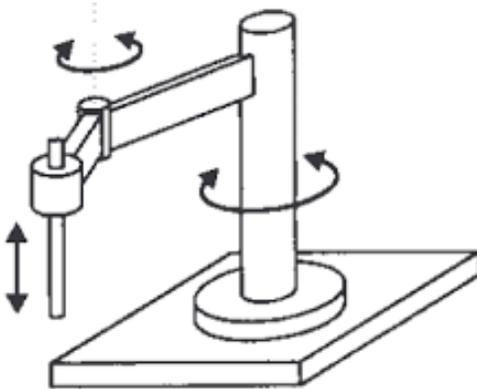
Características Robot SCARA

La composición de un robot SCARA, consiste 3 articulaciones; divididas en 2 articulaciones rotacionales y 1 articulación prismática. Las rotaciones se mueven paralelamente entre ellas, mientras articulación prismática se mueve de manera perpendicular al plano de las otras dos. Naturalmente el orden de las articulaciones es: articulación rotacional, articulación rotacional y articulación prismática o a su vez una articulación prismática seguida de dos articulaciones rotacionales.

La Figura 6, es el ejemplo de la primera combinación la cual muestra el movimiento de cada una de las articulaciones dentro del plano.

Figura 6

Articulaciones de un robot tipo Scara

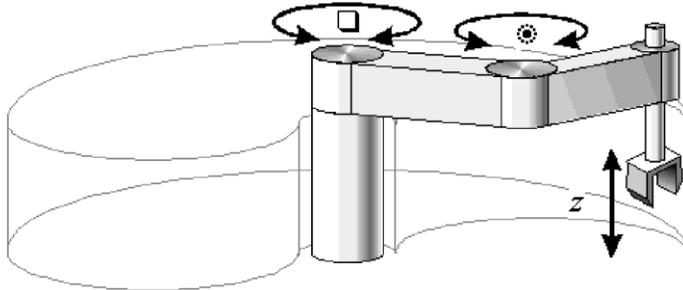


Nota. Tomada de Generalitat (s.f).

Una característica importante, de los movimientos del robot SCARA es la precisión y la velocidad en la que ejecuta los movimientos. El pequeño defecto que tiene es: la zona de trabajo útil perpendicular a su eje prismático que posee. De lo que se puede obtener la conclusión que puede tener libertad de movimiento en los ejes X e Y, pero con el eje Z tiene un movimiento limitado en la parte de la muñeca donde se encuentra naturalmente el actuador. Dentro de la industria poseen un volumen irregular de trabajo debido a estas características ya descritas (Generalitat, s/f).

Figura 7

Definición del volumen de trabajo de un robot tipo SCARA tipo RRP



Nota. Tomada de Generalitat (s.f.).

Aplicaciones del robot SCARA en la industria.

En la industria, los robots SCARAs posee una gran variedad de aplicaciones industrial, naturalmente en las que es requerida operación en un solo plano. Las aplicaciones más comunes de utilizar a los robots manipuladores son:

- Realizar la distribución o dispensación de material.
- Realizar soldadura industrial
- Realiza la clasificación colocación de piezas.
- Realizar de montaje y desmontaje de componentes ya sean mecánico o electrónicos.
- Operación de atornillado, fresado o rotulado.
- Colocar y dispensar de equipos y suministros médicos

La visión artificial es uno de los principales requisitos para poder realizar las aplicaciones ya mencionadas, en la actualidad algunos modelos de robots tienen la capacidad

de procesar imágenes debido a al hardware y software que ya vienen implementados para dicha tarea. La eficiencia aumenta con el uso de estos accesorios para el desarrollo de diferentes aplicaciones. En la Figura 8 se puede ver un claro ejemplo de la aplicación del robot SCARA y el uso de la visión artificial .

Figura 8

Aplicación del robot tipo SCARA



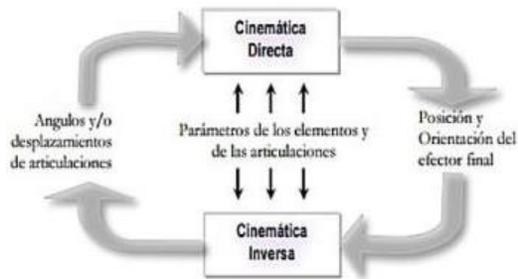
Nota. Tomada de Cuauhtémoc (2000).

Cinemática de Robots SCARA

La cinemática del robot SCARA se define como el estudio del movimiento respecto a un punto o sistema de referencia. Este estudio omite las fuerzas/momentos que se pueden presentar o actúen sobre el sistema en movimiento, en realidad lo único que este interés es la geometría del movimiento del robot en función del tiempo (posiciones, velocidades, aceleraciones). El estudio cinemático se puede dividir en dos, tal como se observa en la Figura 9 (Botero, 2005).

Figura 9

Cinemática de un manipulador robótico



Nota. Tomada de Cárdenas (2019).

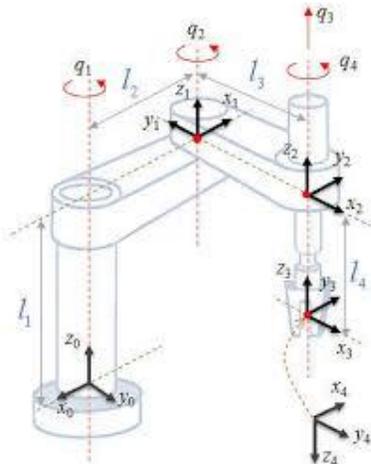
Cinemática Directa SCARA

El estudio de la cinemática directa radica, en el cálculo de la posición del actuador a partir de una matriz de transformación, el cual está relacionado con el eje de coordenadas en el que se encuentra el robot, quien también usa ecuaciones con parámetros específicos de los valores conocidos de las articulaciones y los parámetros geométricos del robot. La Figura 10 es ejemplo de la forma en la cual se definen los parámetros necesarios para poder relacionarlos dentro de una matriz, y puede ser representado en la ecuación (1).

$$P(x,y,z,th0,th1,th2)=f(q1,q2,q3,q4) \quad (1).$$

Figura 10

Ilustración de los parámetros geométricos del robot SCARA.

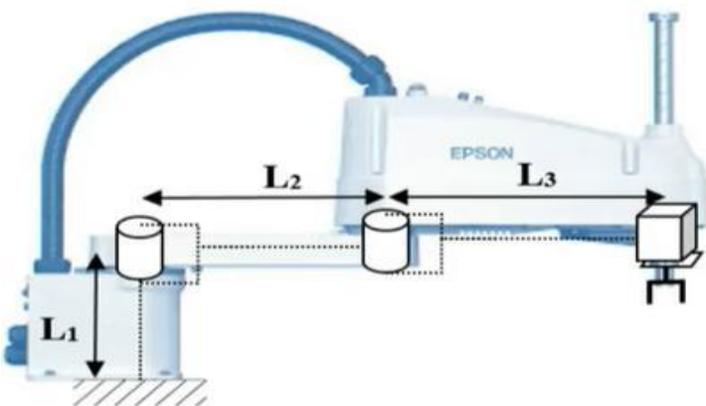


Nota. Tomada de González (2019).

Para caso particular del robot SCARA la cinemática directa está dada por la matriz de rotación homogénea.

Figura 11

Desacople cinemático de un robot SCARA



Nota. Tomada de González (2019).

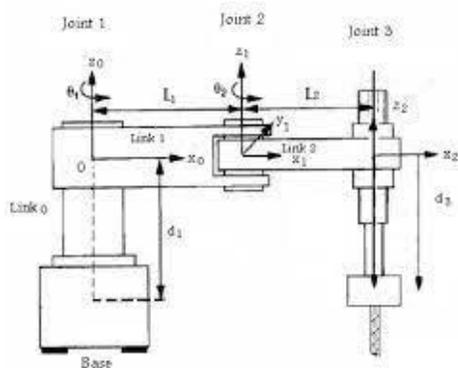
$$H_3^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \cos(q_1) + l_4 \cos(q_1 + q_2) \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \sin(q_1) + l_4 \sin(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & l_1 - l_3 + q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cinemática Inversa SCARA

La cinemática inversa, tiene como objetivo realizar lo opuesto a la directa, es decir, a partir de una posición en el espacio encontrar los parámetros para adoptar las coordenadas articulares del robot de igual manera es muy importante la geometría que tiene el robot. A continuación, se puede observar en la figura 12 (Barrientos et al., 2007).

Figura 12

Cinemática inversa de un manipulador



Nota. Tomada de González (2019).

Para caso particular del robot SCARA la cinemática directa está dada por la matriz de rotación homogénea.

Figura 13

Desacople cinemático de un robot SCARA



Nota. Tomada de Celis (2006).

Figura 14

Desacople cinemático de un robot SCARA

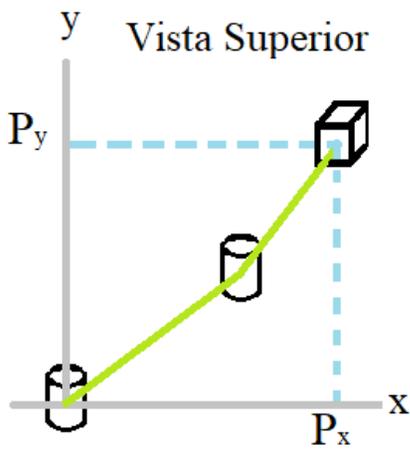
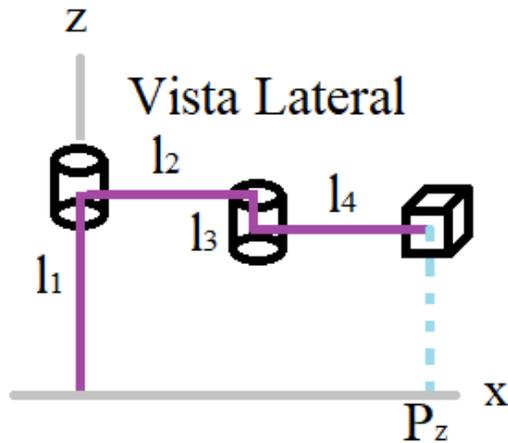


Figura 15

Desacople cinemático de un robot SCARA



Al realizar el cálculo se pueden obtener las fórmulas 1, 2 y 3 para poderlas utilizar en control de posición de los robots SCARAs al dar una coordenada y obtener los valores de q_1 , q_2 y q_3 .

$$q_1 = \text{atan2}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) - \text{atan2}\left(\frac{l_3 * \text{sen}(q_2)}{l_2 + l_3 * \text{cos}(q_2)}\right) \quad (1)$$

$$q_2 = \text{atan2}\left(\pm \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_x^2 + P_y^2 - l_2^2 - l_4^2}{2 * l_2 * l_4}\right)^2}{\frac{P_x^2 + P_y^2 - l_2^2 - l_4^2}{2 * l_2 * l_4}}}\right) \quad (2)$$

$$q_3 = P_z - (l_1 + l_3) \quad (3)$$

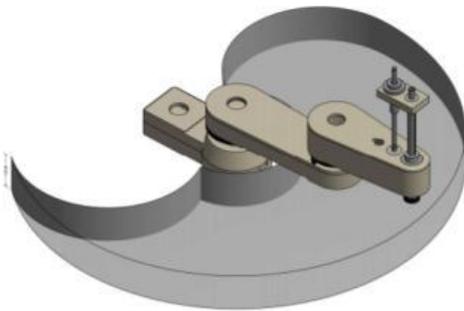
Volumen de trabajo de SCARA

El espacio en el que puede desplazarse la muñeca de un robot es conocido como volumen de trabajo, es importante no se toma en cuenta el efector final debido a que la muñeca del robot tiene la capacidad de usar grippers de distintos tamaños.

El volumen de trabajo de un robot puede ser regular o irregular dependiendo de la configuración y estructura física del robot, por ejemplos los robots cartesianos y cilíndricos presentar volúmenes regulares, mientras los polares y SCARA poseen un volumen irregular como se ve reflejada en la figura 16 (García, 2003).

Figura 16

Volumen de trabajo SCARA



Nota. Tomada de García (2003).

Precisión de Movimientos del SCARA

En la industria, la precisión, una de los requisitos más importantes, dependen de tres parámetros esenciales:

- **La resolución espacial:** Es conocido como el incremento más pequeño de movimiento que puede ejecutar un robot, el cual depende directamente del sistema de control y de la falta de exactitud mecánicas del robot.
- **La exactitud:** Conocida como: la capacidad del robot para poder situar el extremo de su muñeca a punto específico en el volumen de trabajo, esta exactitud cambia, por ejemplo: El robot tiende a presentar mayor exactitud el posicionamiento de operación es cerca de la base, mientras más alejado se encuentre el brazo de la base, bajara el

parámetro exactitud. Esto se debe a inexactitudes mecánicas se incrementan al ser extendido el brazo y tienen que ser consideradas al momento de su diseño.

La resolución espacial y la exactitud son directa proporcional, es decir, mientras mayor capacidad del control del robot significa, se puede dividir el volumen de trabajo en incrementos muy pequeños.

- **La repetibilidad:** La repetibilidad es el factor que; está ligado a la capacidad que tiene un robot de ir o regresar a un punto específico en el espacio de trabajo. (García, 2003).

Disposición de la celda de trabajo para Robot Industrial

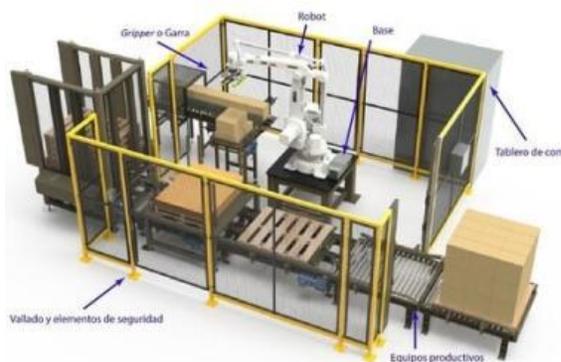
Las celdas de manufactura autónomas, tienen la disposición general de dar la importancia a un robot industrial con aspectos relevante, es decir, dependen exclusivamente de los requerimientos del proceso que éste vaya a realizar. En la tabla 2 se muestran algunos ejemplos de las disposiciones que se dan:

Tabla 2*Disposiciones de un robot industrial en una celda de trabajo*

Disposición	Detalles	Tipos	Usos
Centro de la Celda	Usar la mayor parte del volumen de trabajo del robot.	SCARA, Polares y Cilíndricos.	Realizar montaje y desmontaje, carga y Descarga, proceso de soldadura, ensamble y desensamble de piezas
En línea	Proceso secuencial	SCARA, Polares y Cilíndricos.	Líneas de transporte, soldadura automotriz.
Robot Móvil	Guía en la cual se desplaza el robot.	ARM, Robots orugas o con cadena	Trabajo sobre piezas en movimiento, carga y descarga de máquinas.
Robot Suspendido	Mejor aprovechamiento del área de trabajo.	Robot tipo pórtico	Movimiento de material, colocación de adhesivos, corte, realización de soldadura industrial.

Figura 17

Robot en una celda de manufactura



Nota. Tomada de Garcia (2003).

Es importante, al momento de implementar una celda de trabajo para robot tomar en cuenta las siguientes recomendaciones y aspectos como se ilustra en la figura 18 (Groover, 2007):

Figura 18

Aspectos que se toman en cuenta para la implementación de un robot en una celda de trabajo



Cada modelo MRI tiene sus propias características y tareas determinadas que se desean realizar. Los cuales ayudan a determinar con precisión el tipo de características que se necesitan para cada aplicación. La Tabla 3 muestra el ejemplo de tipos de trabajos a aplicar.

Tabla 3*Ejemplos de trabajos de celdas de manufactura*

Pintura	Paletizado
Programación guiada	Capacidad de soportar gran carga
Acción realizada por el ser humano	El tamaño del robot y área de trabajo con directamente proporcional
Forma antropomórfica	Control PTP
6 GDL	
Procesado	Ensamblado
Sistema de programación	Alta precisión y velocidad en movimiento
5 – 6 GDL	Acción realizada por el ser humano
Acción realizada por el ser humano	Programación de alto nivel
Trayectoria controlada por ser humano	Sistema Sensorial

Sistemas de Visión Artificial en la celda de manufactura

Los sistemas capaces de integrar y procesar imágenes digitales, son los sistemas robustos de visión artificial, dispositivos de entrada y salida, redes de computadores. Los que son utilizados para la inspección o el control de la producción mediante equipos especializados como brazos robóticos o manipuladores industriales de alta eficiencia.

En la actualidad, se ha logrado implementar modelos matemático y técnicas, que permiten obtener mayor y mejor información que es procesado por los robots para obtener mejores resultados dentro del sistema de producción, como, por ejemplo, la identificación de patrones, detección de colores, calcular profundidades, entre otros ejemplos. Con el pasar de

los años, los sistemas de visión artificial han tenido un auge tanto en industria tecnología, en la propia filosofía del sistema de visión. Con el pasar del tiempo han existido cambios relevantes en la forma de interpretar la visión como una herramienta standard para el análisis de procesos. Como se muestra en la figura 19:

Figura 19

Análisis de procesos



El sistema de visión artificial es usado en el siguiente grupo de empresas como principal elemento de control y supervisión de la producción: Automoción, Alimenticia, Sector Farmacéutico, Electrónica, Robótica, Seguridad/ Vigilancia, Envase y embalaje entre otras.

Figura 20

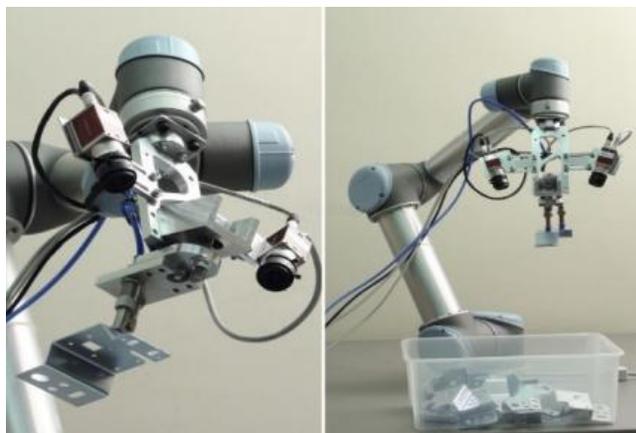
Aplicaciones de robots manipuladores



Nota. Tomada de Morillo (2017),

Figura 21

Aplicaciones de robots manipuladores



Nota. Tomada de Morillo (2017).

Componentes de una celda con robots cooperativos

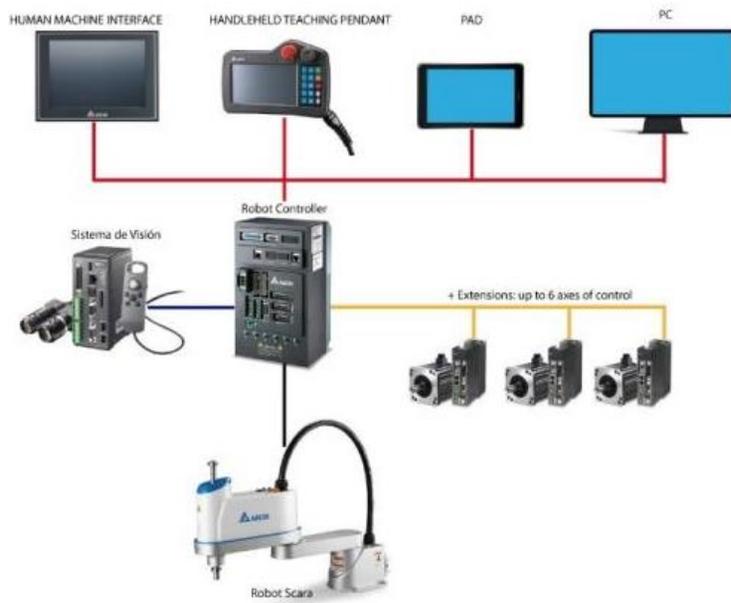
Las aplicaciones industriales; para los sistemas integrados de robots colaborativos han sido implementados recientemente en el mercado robótico. Los movimientos cooperativos son un desafío para la industria y su aplicación, debido a la importante que existe para poder aumentar la flexibilidad (Cardenas & Campuzano, 2019). Una celda robotizada integrada por robots cooperativos es exactamente la misma, si comparamos los componentes que necesita una celda de trabajo común y tradicional; un claro ejemplo es cuando se tiene una celda industrial de ensamblaje; compuesta de un manipulador robótico que es operado con una HMI (Human Machine Interface) y panel de control la cual permite mostrar datos a través de un software (ISA, 2015).

Para poder entender mejor la diferencia entre la celda clásica y una celda cooperativa es la introducción de una red de comunicación; que permite a los controlar y supervisar el proceso de forma remota (KUKA, 2017). La red mencionada es en tiempo real intercambiar datos y señales para coordinar tareas de manera cooperativa.

Otra diferencia es como se muestra en la figura 22 donde se muestra el uso de un sistema SCADA con HMI para todos los robots de la célula robótica con el que se controla el proceso.

Figura 22

Topología física de un robot



Nota. Tomada de KUKA (2017).

Implementación de una celda inteligente con arquitectura de robots colaborativos

La arquitectura de los robots colaborativos en una celda flexible consta de tres partes principales, éstas serán las responsables del correcto funcionamiento de una celda flexible que consta de robots colaborativos: (Makris et al., 2012).

- **Herramientas Reconfigurables:** Permite a los equipos de montaje flexibles adaptar fácilmente el proceso que se esté realizando a posibles perturbaciones en el mismo.

- **Sistema Inteligente de control y supervisión:** Permite un mayor rendimiento y una reconfigurabilidad de alto nivel de los procesos de producción con el uso de controles distribuidos y abiertos vinculados a la información de sensores. El enfoque que se usa está basado en sensores que ayudan a potenciar al marco de control descentralizado basado en una arquitectura orientada a servicios.
- **Integración y Comunicación:** Permite la integración y la conexión en red de los sistemas de control mediante la utilización de tecnologías que nos permitan la operación coordinada, cooperativa entre los robots.

En la Figura 23, se puede observar una línea de ensamblaje de autos, en la que se tiene varios robots en línea los cuales tienen una integración y comunicación entre ellos, un sistema inteligente que envía las señales respectivas al sistema, y así realizar las acciones requeridas con la herramienta necesaria, realizando de esta manera un trabajo cooperativo.

Figura 23

Línea ensamble de autos



Nota. Tomada de Ansoategui (2015).

Los robots de una celda robótica flexible generalmente requieren de una calibración para aumentar la precisión del sistema, dicha calibración se realiza con instrumentos de medida y/o software aplicado para dicha calibración. Por tal motivo, se han establecido una serie de pasos para la implementación de una celda flexible con robots colaborativos dividido en tres etapas (KUKA, 2007):

1. Realización de Planeación

- 1.1. Definir número de robots total.
- 1.2. Definir carga de trabajo cada robot.
- 1.3. Definir el robot principal encargado del proceso.

2. Etapa de iniciación de la celda

- 2.1. Conexión de los cables.
- 2.2. Configuración local y remota cada robot.

3. Implantación de la configuración en la celda

- 3.1. Usar la interfaz para configurar la celda robótica.
- 3.2. Identificar y configurar el posicionamiento de todos los elementos que conforman la celda a los robots.
- 3.3. Toma y calibración de herramientas.

4. Programación de la celda

- 4.1. Programación final del proceso

Resumen

En 1978, Japón desarrolló un manipulador robótico de 3 grados de libertad caracterizado por; la velocidad y la precisión al realizar movimientos, el cual tendría una gran cantidad aplicaciones dentro de la industria y sobre todo en los trabajos realizado sobre un solo plano. Pero para poder entender, de mejor manera es necesario realizar el estudio cinemático y dinámico para poder determinar las variables articulares para controlar y monitorear el posicionamiento del robot en el espacio; las fuerzas, aceleraciones y velocidades a las que tiende el robot estar sometido en su funcionamiento. Además, la construcción y conocimiento de todos estos parámetros ayudan a la selección del actuador del SCARA para realizar un trabajo en específico.

El entorno de trabajo, puede ser caracterizado por un sistema de visión artificial, el cual nos va a permitir definir el área de trabajo. La tecnología avanza y con ella las nuevas formas de innovación se implementan dentro de la industria; como el empleo de nuevos sensores que mejoren la respuesta al proceso o sistemas de cámaras para aplicar visión artificial o algoritmos de aprendizaje para mejorar y controlar el proceso.

En la industria actual, la implementación de células de trabajo se logra al coordinar la cooperación de múltiples robots para realizar tareas u operación al mismo tiempo, a este trabajo se lo conoce como: “trabajo colaborativo” y se lo ocupa en las nuevas industrias debido a la flexibilidad que ofrecen. La principal diferencia entre una celda de trabajo clásica con una celda inteligente es la introducción de una red de comunicación entre los controladores de todos los robots existentes. Una celda inteligente consta de tres partes: herramientas configurables, sistema inteligente de control-supervisión e integración y comunicación.

Capítulo III

Situación actual de la celda inteligente

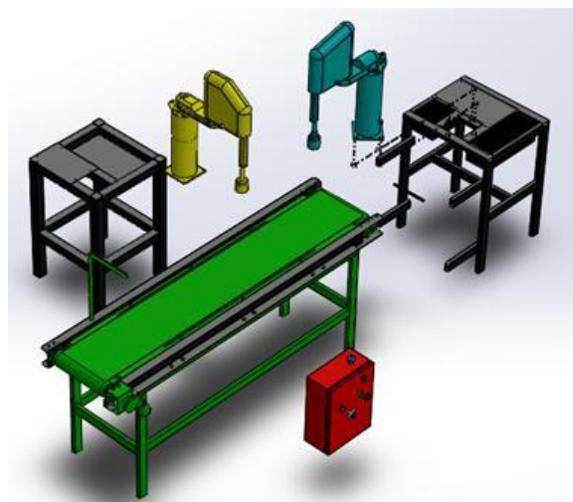
En el Capítulo 3 se detalla el análisis realizado, del estado en el cual se recibe la celda inteligente. Se evalúa cualitativamente (bueno, regular o malo) cada una de las partes que la conforman y son necesarias para su correcto funcionamiento. Se identifica los elementos faltantes y se detalla su proceso de adquisición. Por último, se describen las acciones realizadas para recuperar las diferentes partes de la celda.

Estado actual de la celda inteligente

Se divide la celda en tres grupos para su respectivo análisis en el cual se detallarán los componentes de cada uno. Los grupos se indican a continuación:

Figura 24

Celda inteligente



Robot Scara 1



Caja de control



Robot Scara 2



Banda transportadora

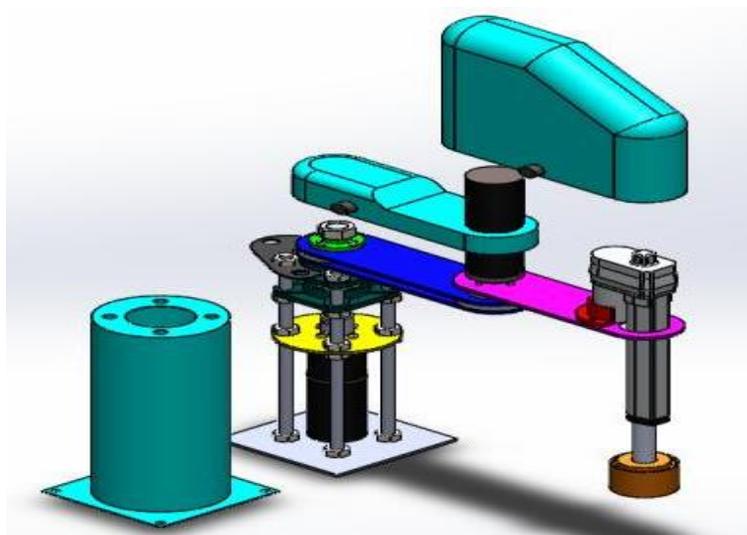
Nota. Realizado por Andrés Pérez.

Robot SCARA.

El robot tipo SCARA está formado por los componentes que se indican en la Figura 25. Se realizó una evaluación cuantitativa para determinar el estado de cada pieza y las acciones que se van realizan con cada una para un desempeño más eficiente del robot.

Figura 25

Partes principales Robot Scara 1



	Placa motor base		Placas brazo 1
	Acople Soporte motor lineal		Electroimán
	Acople Soporte motor base		Placa Soporte motor lineal
	Carcasa		

Nota. Realizado por Andrés Pérez.

Tabla 4

Inventario técnico / estado actual del robot SCARA 1

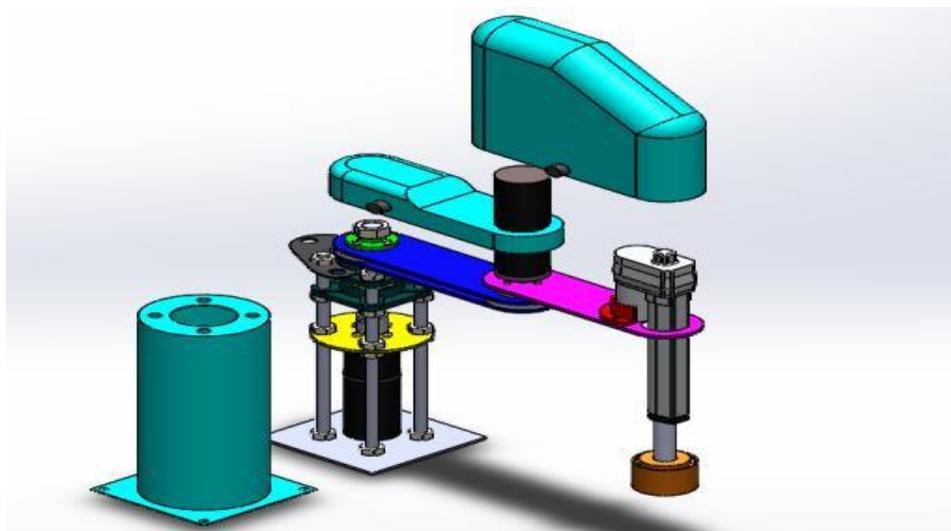
Orden	Sistema/ Subsistema	Faltante	Estado actual			Acciones a tomar
			Bueno	Regular	Malo	
3.1.1	Robot SCARA 1			X		- Limpieza general de las piezas - Eliminación de oxido - Cambio de cables de conexión
3.1.1.1	Carcasa			X		- Remoción de pintura vieja - Eliminación de oxido - Pulido - Pintado
3.1.1.2	Electroimán				X	- Cambiar acople - Adquisición de un electroimán de 24 V
3.1.1.3	Acople Soporte motor lineal				X	- Eliminar cartones, epoxi y siliconas. - Cambiar acople para eliminar juegos
3.1.1.4	Placa de Soporte motor lineal		X			- Eliminar óxidos - Lijar - Pintar
3.1.1.5	Placa motor base				X	- Eliminar Epoxi - Retirar potenciómetro y engranes - Diseñar nueva placa corrigiendo distancias de engranes
3.1.1.6	Acople soporte motor base				X	- Retirar pasadores y tornillos - Diseñar nuevo acople corrigiendo centros de tornillos
3.1.1.17	Soporte potenciómetro brazo 2	X				- Diseñar soporte para el segundo potenciómetro que contiene una caja reductora y su respectivo acople
3.1.1.8	Placas brazo 1		X			- Eliminar oxido - Lijar - Pintar

Robot SCARA 2.

El robot tipo SCARA está formado por los componentes que se indican en la Figura 26. Se realizó una evaluación cuantitativa para determinar el estado de cada pieza y las acciones que se van realizan con cada una para un desempeño más eficiente del robot.

Figura 26

Partes principales Robot Scara 2



	Placa motor base		Placas brazo 1
	Acople Soporte motor lineal		Electroimán
	Acople Soporte motor base		Placa Soporte motor lineal
	Carcasa		

Nota. Realizado por Andrés Pérez.

Tabla 5*Inventario técnico / estado actual del robot SCARA 2*

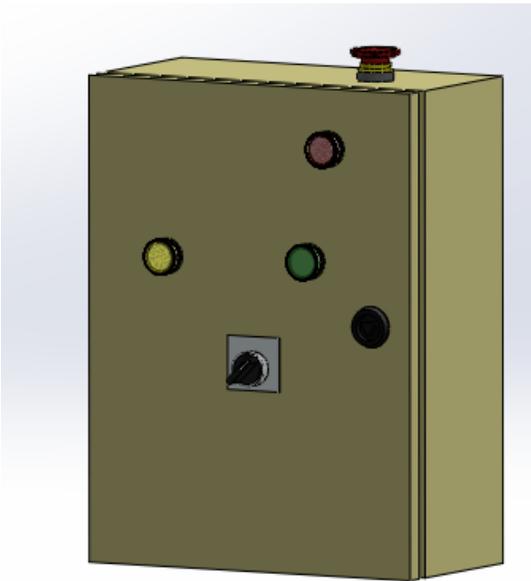
Orden	Sistema/ Subsistema	Faltante	Estado actual			Acciones a tomar
			Bueno	Regular	Malo	
3.1.2	Robot SCARA 2				X	- Limpieza general de las piezas - Eliminación de oxido - Cambio de cables de conexión - Remoción de pintura vieja
3.1.2.1	Carcasa			X		- Eliminación de oxido - Pulido - Pintado
3.1.2.2	Electroimán				X	- Cambiar acople - Adquisición de un electroimán de 24 V
3.1.2.3	Acople Soporte motor lineal				X	- Eliminar cartones, epoxi y siliconas. - Cambiar acople para eliminar juegos
3.1.2.4	Placa de Soporte motor lineal		X			- Eliminar óxidos - Lijar - Pintar
3.1.2.5	Placa motor base				X	- Eliminar Epoxi - Retirar potenciómetro y engranes - Diseñar nueva placa corrigiendo distancias de engranes
3.1.2.6	Acople soporte motor base				X	- Retirar pasadores y tornillos - Diseñar nuevo acople corrigiendo centros de tornillos
3.1.2.7	Soporte potenciómetro brazo 2	X				- Diseñar soporte para el segundo potenciómetro que contiene una caja reductora y su respectivo acople
3.1.2.8	Placas brazo 1		X			- Diseñar un nuevo brazo para reducir el peso del mismo.

Caja de control.

En la Figura 27 se puede observar el tablero de control implementado actualmente al cual se analizará sus componentes internos para que funcione en óptimas condiciones.

Figura 27

Tablero de control implementado



Nota. Realizado por Andrés Reyes.

Tabla 6*Inventario técnico / estado actual del tablero de control*

Orden	Sistema/ Subsistema	Faltante	Estado actual			Acciones a tomar
			Bueno	Regular	Malo	
3.1.3	Tablero de control				X	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensionar de acuerdo a los elementos a ocupar - Cambio de cables de conexión - Ventilación - Etiquetado de cables
3.1.3.1	Carcasa			X		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensionar una caja en la cual circule el aire y evite el sobrecalentamiento de los componentes - Realizar perforaciones para ingreso y salida de cables con sus respectivos acoples
3.1.3.2	Doble fondo				X	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminar cinta doble faz y siliconas para fijar componentes - Instalar canaletas para pasar cables
3.1.3.3	Componentes electrónicos				X	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobar el funcionamiento de los componentes - Reemplazar elementos dañados - Diseñar placas y separarlas para evitar una conexión a tierra
3.1.3.4	Canaletas	X				<ul style="list-style-type: none"> - Medir y cortar las canaletas - Instalar con tornillos autoperforantes
3.1.3.5	Cableado				X	<ul style="list-style-type: none"> - Cablear los componentes de las borneras a los circuitos impreso - Etiquetar los cables
3.1.33	Riel DIN 35	X				<ul style="list-style-type: none"> - Cortar el Riel Din - Biselar para evitar aristas vivas - Instalar en el doble fondo con tornillos autoperforantes
3.1.3.7	Fusible	X				<ul style="list-style-type: none"> - Dimensionar el consumo energético - Adquisición de fusible
3.1.3.8	Borneras	X				<ul style="list-style-type: none"> - Adquirir borneras - Instalación con topes y tierras en el riel

Al analizar los tres grupos se resume en la tabla 7 los elementos faltantes y su forma de obtención.

Tabla 7

Acciones a tomar de piezas faltantes

Elemento o pieza	Decisión		Observaciones
	Adquisición	Construcción	
Electroimán	X		Se procede a la compra de 2 electroimanes de 24 V
Caja de control	X		Se necesita una caja de 60 cm de alto
Canaletas	X		
Riel DIN	X		
Borneras	X		
Ventilador	X		
Acople Soporte motor lineal		X	Será construido mediante FDM en un plástico ABS
Placa motor base		X	Será construido mediante FDM en un plástico ABS
Acople soporte motor base		X	Será construido mediante FDM en un plástico ABS
Acople caja reductora		X	La caja reductora necesita mantenerse fija para sensar con el potenciómetro en su extremo la posición

Las demás piezas se realizará un mantenimiento para asegurar su correcto funcionamiento. En la siguiente tabla se muestra en porcentaje las acciones realizadas en la celda inteligente.

Tabla 8*Porcentaje de las acciones realizadas*

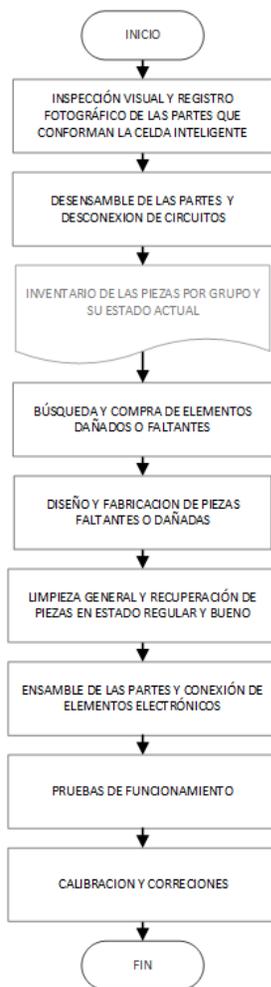
Elemento o Pieza	Acción	Porcentaje
Faltantes	Construcción	24%
	Adquisición	24%
Existentes	Mantenimiento	38%
	Adquisición	14%
Total		100%

Estructura del Mantenimiento.

En la primera etapa se ejecutará un mantenimiento correctivo para la recuperación de la celda y cada una de las partes que la conforman, el procedimiento a seguir se encuentra detallado en el diagrama de flujo de la figura 28.

Figura 28

Diagrama de flujo de trabajo



Recuperación de las piezas mecánicas de la celda inteligente.

Se realizaron los procesos descritos en cada sección dependiendo de los problemas encontrados para la recuperación de las piezas de la celda inteligente

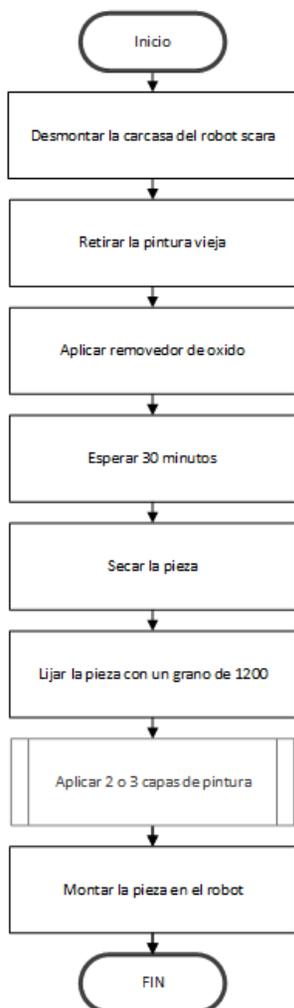
SCARA 1.

Carcasa.

La parte externa que cubre y protege al robot presenta oxido en los lugares donde se ha removido la pintura por el uso o el tiempo. Para evitar la corrosión del metal se procede a despintar, lijar y pintar para cubrir toda la superficie los pasos a seguir se indican el diagrama de flujo de la figura 29.

Figura 29

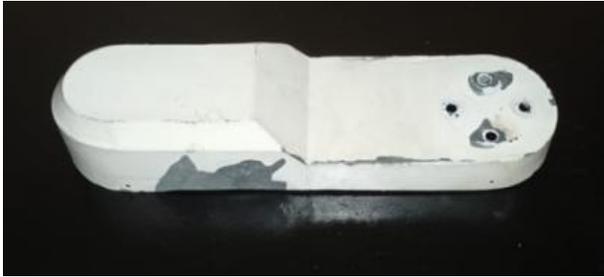
Diagrama de flujo de trabajo



En las siguientes imágenes se muestra el estado inicial y el final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa.

Figura 30

Estado inicial y final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa



Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Figura 31

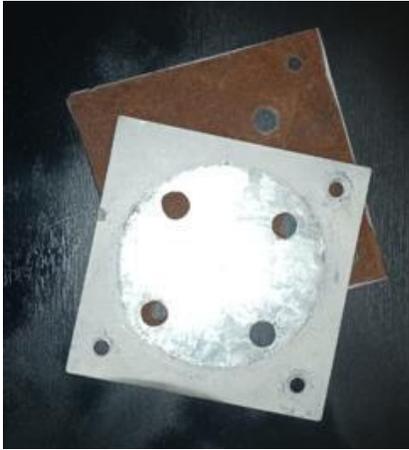
Estado inicial y final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa



Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Figura 32

Estado inicial y final del proceso explicado en el diagrama de flujo de la carcasa



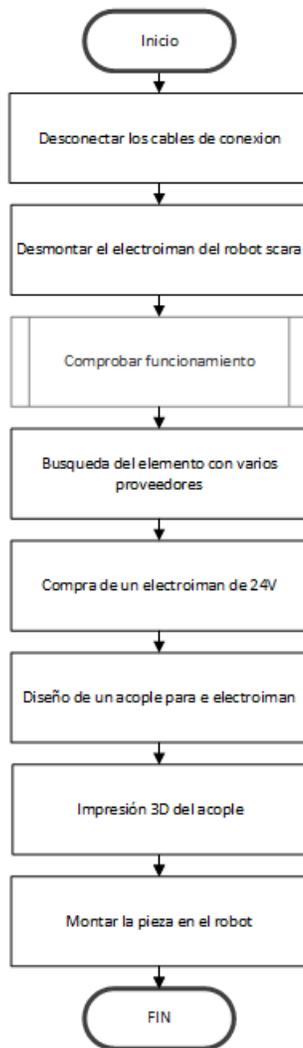
Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Electroimán.

El electroimán que utilizaba presentaba desgaste en el bobinado de cobre para evitar un posible cortocircuito, se lo reemplazó por un electroimán de uso comercial y se diseñó un acople para el motor lineal. En la figura 33 se muestra el diagrama de flujo con las actividades que se realizaron para la recuperación del electroimán.

Figura 33

Diagrama de flujo con las actividades que se realizaron para la recuperación del electroimán



A continuación, se puede observar el antes y el después del reemplazo de la pieza.

Figura 34

Antes y el después del reemplazo de la pieza



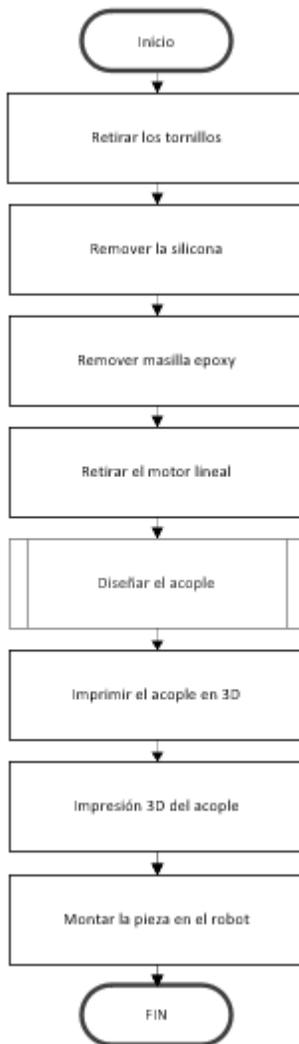
Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Acople soporte del motor lineal

El acople del motor lineal estaba elaborado en duralón, presentaba epoxi y silicona para eliminar juegos que se producen por el motor lineal y la placa, para tal motivo, se diseñó un nuevo acople en impresión 3D. A continuación, se muestra el diagrama de flujo con las actividades que se realizaron.

Figura 35

Diagrama de flujo con las actividades que se realizaron para el diseño de un nuevo acople en impresión 3D



A continuación, se puede observar en las siguientes figuras lo anteriormente mencionado:

Figura 36

Estado inicial del acople de motor lineal SCARA 1



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Figura 37

Estado final del acople de motor lineal SCARA 1



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Figura 38

Estado inicial del acople de motor lineal SCARA 2



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Figura 39

Estado final del acople de motor lineal SCARA 2



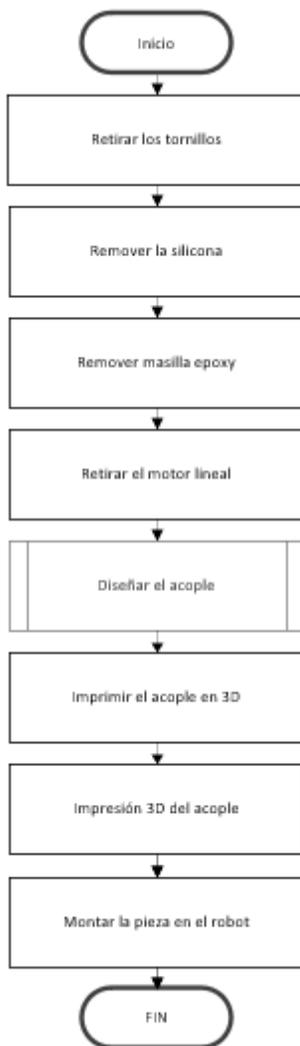
Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Placa de Soporte motor lineal.

La placa presenta óxido en algunas partes por lo cual se procede a sumergirla en líquido removedor de óxido y a lijarla para remover pintura vieja y rebabas existentes. En la figura 40 se muestra el diagrama de flujo con las actividades realizadas en la placa del soporte lineal.

Figura 40

Diagrama de flujo con las actividades realizadas en la placa del soporte lineal



En la figura 41 se muestra el antes y después de la pieza aplicando las actividades descritas en el diagrama de flujo para su recuperación.

Figura 41

Antes y después de la pieza aplicando las actividades descritas en el diagrama de flujo para su recuperación



Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Figura 42

Antes y después de la pieza aplicando las actividades descritas en el diagrama de flujo para su recuperación



Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

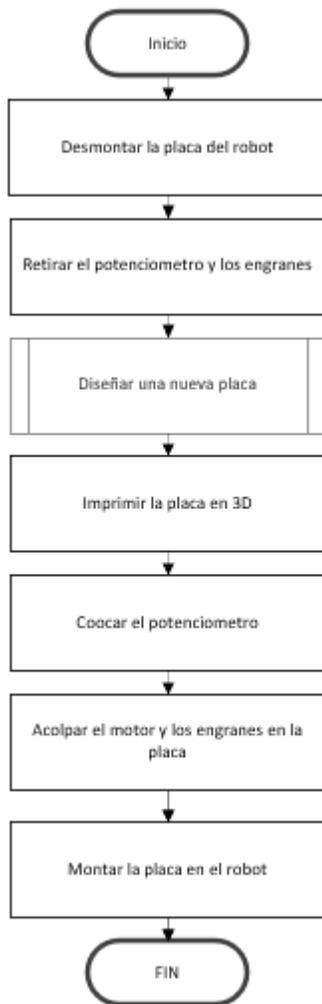
Placa motor base.

La placa presenta múltiples perforaciones debido a la distancia de centro de los engranes implementados de igual manera por el diámetro de los engranes las tuercas que lo fijan desplazadas para que no interfieran con el movimiento, para corregir el problema se diseñó una nueva placa en la cual se ocultan las cabezas de los tornillos para cambiar el

diámetro y la relación de los engranes para darle una mayor precisión al robot. En el diagrama de flujo de la figura 43 se muestra las actividades que se realizaron para la recuperación de la pieza.

Figura 43

Diagrama de flujo donde se refleja las actividades realizadas para la recuperación de la pieza



En la figura 44 se puede ver la placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos en el diagrama de flujo.

Figura 44

La placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos en el diagrama de flujo



Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Figura 45

La placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos en el diagrama de flujo



Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Figura 46

La placa antes y después de aplicar los procesos de recuperación descritos en el diagrama de flujo



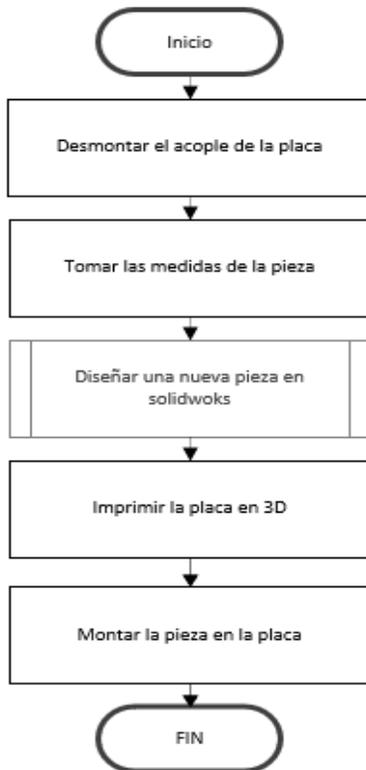
Nota. Tomada por Andrés Pérez (2022).

Acople soporte motor base

El acople presenta varias perforaciones lo cual dificulta el ensamble de la pieza, también disminuye a resistencia de la misma lo que puede ocasionar una ruptura en el punto de diseño otra para reemplazarla. En la figura 47 se detallan las actividades realizadas.

Figura 47

Actividades realizadas para el acople soporte motor base



A continuación, se observa el antes y después de la pieza

Figura 48

El antes de la pieza



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Figura 49

El después de la pieza



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Soporte potenciómetro brazo 2

El soporte de la caja reductora en la cual esta acoplada el potenciómetro tiene cinta taípe para evitar movimientos se retiró la cinta y se cambió la relación de la caja reductora para mejorar la posición. En las figuras 50 y 51 se detallan las actividades realizadas en un diagrama de flujo.

Figura 50

Actividades realizadas en un diagrama de flujo para el soporte potenciómetro brazo 2



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

Figura 51

Actividades realizadas en un diagrama de flujo para el soporte potenciómetro brazo 2



Nota. Tomada por Andrés Reyes (2022).

La casa de la calidad (QFD)

Despliegue de la función de calidad (QFD)

La voz del cliente (Requerimientos del usuario).

El proceso a seguir es la técnica de entrevista personal, a los docentes y encargados de laboratorio de robótica para; cubrir las necesidades en el prototipo de la celda. Las principales características y requerimientos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9

Requerimientos del usuario para la QFD

N°	Requerimiento
1	Medida acorde a la celda actual
2	Mínimo trabajo físico
3	Facilidad de uso
4	Duración a través del tiempo
5	Fácil mantenimiento
6	Alimentación constante y continua

Características Técnicas (La voz de Ingeniero).

A partir de los requerimientos del usuario, se definen los requerimientos para el diseño según se muestran en la tabla 10.

Tabla 10*Requerimientos técnicos para la QFD*

N°	Requerimiento
1	Funcionamiento en conjunto
2	Proceso óptimo
3	Detección de material
4	Diseño y construcción de ingeniería
5	Compatible con ROS
6	Espacio y presupuesto

Despliegue de la Función de Calidad QFD.

Figura 52

Despliegue de la Función de Calidad QFD

Dirección de mejora		▲	X	▲	X	X	▼
Requerimientos Funcionales	Importancia	Funcionamiento en conjunto	Proceso óptimo	Detección de material	Diseño y construcción de ingeniería	Compatible con ROS	Espacio y presupuesto
Requerimientos Cliente							
Medida acorde a la celda actual	10	○			○		○
Mínimo trabajo físico	6	▲	○		▲		
Facilidad de uso	7	○	○		○	○	
Duración a través del tiempo	8				○		○
Fácil mantenimiento	5		▲		○	○	○
Alimentación constante y continua	9	○	○	○			▲
Importancia Técnica		84	149	81	174	36	186
Peso relativo		22.2	13.3	17.7	17.7	8.8	20
Dificultad		6	5	8	5	7	9
Incidencia		10.7	15.8	13.8	18.5	5.3	35.6

En las tablas 11 y 12 se detallan los valores que cada uno de los elementos dentro de la QFD fueron utilizados.

Tabla 11*Elementos dentro de la QFD*

Símbolo	Descripción	Valor
⊖	Relación fuerte	9
○	Relación moderada	3
▲	Relación débil	1
	Ninguna	0

Tabla 12*Elementos dentro de la QFD*

Símbolo	Descripción
+	Correlación Positiva Fuerte
++	Correlación Positiva
-	Correlación Negativa
	Ninguna

Conclusiones de la casa de la calidad.

Los requerimientos técnicos se muestran en la tabla 13.

Tabla 13*Requerimientos técnicos*

N°	Características técnicas	% Incidencia
1	Funcionamiento en conjunto	10.7%
2	Proceso óptimo	15.8%
3	Detección de material	13.8%
4	Diseño y construcción de ingeniería	18.5%
5	Compatible con ROS	5.3%
6	Espacio y presupuesto	35.6%

Factibilidad y Planeación.

Una realizado el análisis, se realiza una tabla con la clasificación de los módulos divididos en subsistemas, de tal manera que se obtiene una estructura funcional, la cual cubre cada una de las necesidades establecidas anteriormente. En la Tabla 14 se detallan los subsistemas para el desarrollo del proyecto.

Tabla 14*Subsistemas para el desarrollo del proyecto*

Nº	Módulo	Subsistema	Función
1	Robot SCARA	Cinemática y Dinámica del Robot	Movimiento y posicionamiento del Robot
2	Sistema dispensador de material	Diseño y Construcción Mesa alimentadora	Control de piezas entrante a la celda
		Detección de material	Retroalimentación del estado de la alimentación
3	Sistema de transporte	Velocidad de banda	Control velocidad de piezas
4	Control	Visión Artificial	Detectar objetos, color y forma
		Trabajo Colaborativo entre robots	Trabajo sincronizado de robots
5	HMI	Interfaz Gráfica	Control, supervisión de los valores obtenidos

Sistemas de la celda de manufactura.

La celda de manufactura a implementar incluye el trabajo colaborativo de dos robots SCARA que manipulan piezas que se encuentran en un sistema de transporte basado en una mesa rotatoria. Para el análisis de las alternativas de cada elemento involucrado, se consideran dos partes, un sistema de transporte (mesa rotatoria) y uno de manipulación (robot SCARA), para su detalle por separado. Se debe considerar que al tratarse de una repotenciación no se analiza a fondo las piezas involucradas en los robots SCARA, únicamente las reemplazadas; mientras que, en el sistema de transporte, el desarrollo es completo.

Sistema dispensador de material.

El sistema de transporte se basa en la utilización de una mesa rotatoria que cuenta con capacidad de seis piezas de forma circular metálica para ser manipuladas por los electroimanes con los que cuentan los robots SCARA. Para el diseño de las piezas involucradas en el sistema se hicieron las siguientes consideraciones:

- Tamaño acorde a la celda de manufactura a implementar
- Costo de fabricación de las piezas
- Material adecuado. (Resistencia, peso)
- Facilidad de manufactura
- Disponibilidad en el mercado local (en caso de ser adquirido y no fabricado)

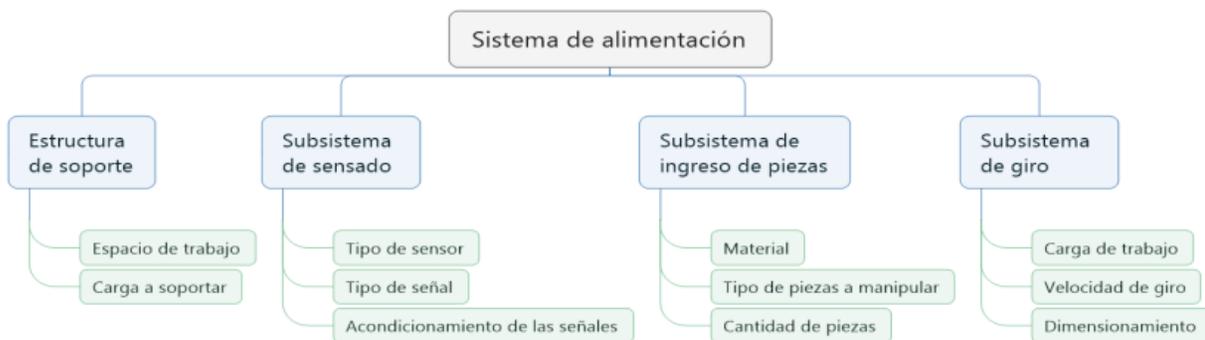
El sistema de alimentación consta de cuatro subsistemas que permiten su funcionamiento adecuado dentro de la celda de manufactura:

- Estructura de soporte
- Subsistema de ingreso de piezas
- Subsistema de giro
- Subsistema de sensado

Adicionalmente a las consideraciones generales que se mencionan previamente, cada subsistema del sistema de transporte requiere de ciertos requerimientos en específico, que se detallan en el siguiente diagrama:

Figura 53

Requerimientos para cada subsistema del sistema de transporte



Nota. Elaboración propia.

Proceso General.

Para que las piezas metálicas ingresen se requiere un sistema que realice la dispensación de estas a la base giratoria para que los robots SCARA las puedan manipular. Se proponen dos alternativas de solución para diseñar el sistema de dispensación de piezas:

Alternativa 1: Banda transportadora

Se plantea diseñar una banda transportadora de dimensiones adecuadas a la mesa circular que permita el ingreso de estas piezas a los receptáculos con los que cuenta la plataforma.

Tabla 15*Ventajas y desventajas de la alternativa 1*

Ventajas	Desventajas
Alta capacidad de alimentación (cantidad de piezas)	Se eleva el costo por la complejidad del sistema
Sistema resistente a altas cargas por peso.	Posible sobredimensionamiento por la capacidad máxima de la plataforma giratoria.

Alternativa 2: Distribución por caída

Se plantea diseñar un sistema que permita almacenar una cantidad de piezas que va a colocarse concéntricamente con los receptáculos de la base giratoria, de tal manera que por gravedad las piezas ocupen los lugares en la base y sean accesibles para los brazos robóticos. El sistema se diseña en ácido poli láctico (PLA) manufacturado por impresión 3D.

Tabla 16*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Simplicidad del sistema	Baja resistencia y capacidad máxima de piezas en comparación con la alternativa anterior.
Costo bajo por material y manufactura	
No involucra piezas móviles.	
No le afecta la corrosión	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 17

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Sistema de banda transportadora		Distribución por caída	
		Ca	Ep	Ca	Ep
Durabilidad	50%	5	2.5	3	1.5
Facilidad de manufactura	30%	1	0.3	5	1.5
Costo	20%	1	0.2	5	1
Total			3.1		4

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la fabricación del sistema de dispensación de piezas metálicas para la base giratoria es la alternativa 2 que propone confeccionar las piezas del sistema por gravedad en PLA.

Estructura de soporte.

La estructura de soporte sirve de apoyo para el mecanismo de mesa giratoria, por lo que debe resistir la carga de los mecanismos utilizados, además de las piezas a manipular por los robots SCARA. Se plantea como solución la implementación de una mesa, cuyas dimensiones se acomoden a las dimensiones de la celda de manufactura y al espacio de trabajo de los robots colaborativos. En consideración a los requisitos planteados en los apartados anteriores, se consideran tres alternativas de diseño de el subsistema:

Alternativa 1: Mesa de madera

Se considera la construcción de una estructura de madera a modo de mesa que permita colocar sobre esta los mecanismos necesarios para el funcionamiento de la plataforma giratoria que transporta las piezas metálicas.

Tabla 18*Ventajas y desventajas de la alternativa 1*

Ventajas	Desventajas
Costo bajo	Peso reducido (puede afectar por vibraciones)
Facilidad de adquisición de material	Dificultad de manufactura
	Material blando, por lo que requiere dimensiones mayores en comparación a otros materiales.
	Tiempo de fabricación considerable

Alternativa 2: Mesa de hierro empernada

Similar a la primera alternativa, pero se cambia el material y el modo de unión de los eslabones. Se considera el uso de tubo cuadrado de hierro negro de 50mm con espesor de 2mm, una vez obtenidos de las longitudes correctas, se procede a unirlos con pernos.

Tabla 19*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia	Requiere de precisión para las uniones empernadas.
Facilidad de adquisición de material	Aumenta el costo por el material y las uniones
Aumenta el peso	Requiere tratamiento de pintura por la corrosión

Alternativa 3: Mesa de hierro con unión soldada

Similar a la primera alternativa, en esta se cambia el modo de unión de los eslabones. Se considera el uso de tubo cuadrado de hierro negro de 50mm con espesor de 2mm, una

vez obtenidos de las longitudes correctas, se procede a unirlos mediante soldadura por electrodo revestido (SMAW).

Tabla 20

Ventajas y desventajas de la alternativa 3

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia	Requiere de precisión para las uniones empernadas.
Facilidad de adquisición de material	No es desarmable.
Facilidad de ensamblaje	
Se reduce el costo en comparación a la alternativa 2 en las uniones.	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 21

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Estructura de madera		Estructura metálica empernada		Estructura metálica soldada	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Facilidad de ensamble	30%	3	0.9	4	1.2	5	1.5
Estabilidad	10%	3	0.3	5	0.5	5	0.5
Resistencia	40%	3	1.2	5	2	5	2
Costo	20%	5	1	4	0.8	4	0.8
Total			3.4		4.5		4.8

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la necesidad de una estructura de soporte es la alternativa 3 que involucra realizar una mesa metálica con uniones soldadas por electrodo revestido (SMAW), ya que presenta el mayor puntaje de las calificaciones asignadas.

Adicional a la mesa para el soporte de los mecanismos necesarios, se requiere de una base que recepte a las piezas metálicas. Se diseñó una estructura circular que cuenta con cavidades para que las piezas a manipular ingresen y se desplacen cuando esta estructura gire. Para el diseño de esta base se proponen tres alternativas:

Alternativa 1: Base de MDF

Se diseña un plato de material MDF de 10mm de espesor, separado en dos capas de 7mm y 3mm unidas entre sí. La unión de estas permite formar las cavidades donde las piezas metálicas ingresan y son desplazadas con el movimiento del plato.

Tabla 22

Ventajas y desventajas de la alternativa 1

Ventajas	Desventajas
Bajo costo	Material blando susceptible a deformaciones
Peso reducido	Baja resistencia
Facilidad de maquinado	

Alternativa 2: Base de aluminio

Se diseña un plato de aluminio de 10mm de espesor que cuente con las cavidades para que ingresen las piezas metálicas a ser manipuladas por los robots SCARA.

Tabla 23*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Media resistencia	Aumenta el peso
	Maquinado complejo (requiere varios procesos de desbaste)
	Aumenta el costo considerablemente

Alternativa 3: Base de hierro

Se diseña un plato de hierro negro de 5mm de espesor que cuente con las cavidades para que ingresen las piezas metálicas a ser manipuladas por los robots SCARA.

Tabla 24*Ventajas y desventajas de la alternativa 3*

Ventajas	Desventajas
Aumenta la resistencia considerablemente en relación a las dos alternativas anteriores	Aumenta el peso considerablemente
	Aumenta la complejidad del maquinado y el desgaste de herramienta en relación al aluminio.
	Aumenta el costo considerablemente

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 25

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Base de MDF		Base de aluminio		Base de hierro negro	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Facilidad de manufactura	30%	5	1.5	4	1.2	3	0.9
Peso	40%	5	2	4	1.6	2	0.8
Costo	10%	5	0.5	2	0.2	2	0.2
Resistencia	20%	3	0.6	4	0.8	5	1
Total			4.6		3.8		2.9

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la necesidad de una base que reciba las piezas metálicas es la alternativa 1 que involucra realizar una base de MDF, en vista que es la que obtiene mayor puntaje en las calificaciones asignadas.

Subsistema de sensado

El subsistema de sensado se ocupa de dos tareas principales, detectar la presencia de piezas metálicas en los receptáculos de la base giratoria y permite determinar la posición angular en la que se encuentra la base giratoria. Esta información es de alta relevancia para el sistema que controla a los robots SCARA, puesto que con estos datos determinan la acción que deben realizar dentro de la celda de manufactura.

Para el sensado de las piezas metálicas en los receptáculos de la base giratoria se proponen tres alternativas para el sensor a utilizar

Alternativa 1: Sensor capacitivo

Se propone colocar un sensor capacitivo orientado verticalmente hacia arriba, de tal manera que apunte hacia los receptáculos que se encuentran en la base giratoria, de tal forma que permita detectar la presencia de las piezas metálicas.

Tabla 26

Ventajas y desventajas de la alternativa 1

Ventajas	Desventajas
Alta precisión en las lecturas	Detección de varios tipos de materiales
Respuesta rápida	Rango de detección corto (1mm - 30mm)
Fácil acondicionamiento de señal.	Dependencia de la constante dieléctrica

Alternativa 2: Sensor inductivo

Se propone colocar un sensor inductivo orientado verticalmente hacia arriba, de tal manera que apunte hacia los receptáculos que se encuentran en la base giratoria, de tal forma que permita detectar la presencia de las piezas metálicas.

Tabla 27*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Alta precisión en las lecturas	Se ve afectado por campos electromagnéticos externos
Respuesta rápida	
Aumenta rango de detección (30 – 50mm)	
Únicamente detecta metales	
Acondicionamiento de la señal sencillo	
Reduce el costo en comparación al capacitivo	

Alternativa 3: Sensor ultrasónico

Se propone colocar un sensor ultrasónico orientado de tal manera que el emisor y receptor apunten hacia los receptáculos para la detección de las piezas metálicas.

Tabla 28*Ventajas y desventajas de la alternativa 3*

Ventajas	Desventajas
Alta precisión en las lecturas	Detecta todo tipo de material
Respuesta rápida	
Aumenta rango de detección (hasta 400cm)	
Reducción de costo	
No requiere acondicionamiento físico de señal.	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 29

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Sensor capacitivo		Sensor inductivo		Sensor ultrasónico	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Precisión	30%	5	1.5	5	1.5	5	1.5
Rapidez en la respuesta	20%	5	1	5	1	5	1
Distancia de detección	10%	3	0.3	3	0.3	5	0.5
Costo	10%	3	0.3	4	0.4	5	0.5
Detección sólo de metales	30%	1	0.3	5	1.5	1	0.3
Total			3.4		4.7		3.8

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada el sensor que detecta la presencia de piezas metálicas en los receptáculos de la base giratoria es el sensor inductivo, al ser el único que exclusivamente detecta metales. A pesar de parecer contradictorio, para el presente caso se prefiere que se detecte únicamente piezas metálicas, puesto que la detección de otros materiales agrega complejidad a la programación del comportamiento de los robots SCARA.

La otra parte del sistema del sensado es la encargada de detectar la posición de la base giratoria donde se encuentran las piezas metálicas. Para solventar esta situación se proponen tres alternativas

Alternativa 1: Interruptor fin de carrera

Se propone acondicionar físicamente un interruptor fin de carrera de tal manera que la base giratoria cuente con salientes que activen la palanca del fin de carrera cada que se encuentren en una posición de interés para el comportamiento de los robots SCARA.

Tabla 30

Ventajas y desventajas de la alternativa 1

Ventajas	Desventajas
Fácil acondicionamiento físico	Posibles rebotes en la detección
Fácil acondicionamiento eléctrico	Posible falso contacto
Costo bajo	
Respuesta rápida	
No requiere acondicionamiento físico de señal.	

Alternativa 2: Sensor de efecto Hall

Se propone acondicionar físicamente un sensor de efecto Hall de tal manera que la base giratoria cuente con imanes que le permitan detectar una posición de interés para el comportamiento de los robots SCARA.

Tabla 31*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Fácil acondicionamiento mecánico	Se ve afectado por la temperatura
Respuesta rápida	Presenta errores de offset
Aumenta rango de detección (hasta 400cm)	Sensible a campos magnéticos cercanos
Reducción de costo	Requiere la instalación de imanes en la base
No requiere acondicionamiento físico de señal.	Aumenta el costo

Alternativa 3: Sensor ultrasónico

Se propone acondicionar físicamente un sensor ultrasónico de tal manera que la base giratoria cuente con salientes que sean detectados por el sensor cada que se encuentren en una posición de interés para el comportamiento de los robots SCARA.

Tabla 32*Ventajas y desventajas de la alternativa 3*

Ventajas	Desventajas
Alta precisión en las lecturas	Puede detectar otros objetos y provocar error en la respuesta de los robots.
Respuesta rápida	
Aumenta rango de detección (hasta 400cm)	
Reducción de costo	
No requiere acondicionamiento físico de señal.	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 33

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Interruptor fin de carrera		Sensor de efecto Hall		Sensor ultrasónico	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Detección de la posición de interés	50%	4	2	3	1.5	2	1
Rapidez en la respuesta	40%	4	1.6	5	2	5	2
Costo	10%	5	0.5	4	0.4	4	0.4
Total			4.1		3.9		3.4

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la detección de la posición de interés de la base giratoria es la alternativa 1 que involucra la adecuación física de un interruptor fin de carrera para su accionamiento con la base giratoria.

Subsistema de ingreso de material

El subsistema de ingreso de material es el que permite que las piezas metálicas sean colocadas dentro de los espacios destinados en la base giratoria. Estas piezas al ser detectadas son manipuladas de acuerdo a la necesidad por los robots SCARA colaborativos involucrados en la celda de manufactura. El subsistema de ingreso de material cuenta con un cuello y un sistema de regulación de posición, que consta de un riel y una mordaza para que las piezas ingresadas se ubiquen de forma precisa dentro de sus receptáculos. Para la

fabricación de estas piezas se consideró un diseño que puede ser aplicable en varios materiales. Las alternativas de materiales son las que se presentan:

Alternativa 1: Piezas fabricadas en aluminio

Se plantea fabricar las tres piezas involucradas en el sistema en aluminio, considerando que el material no es excesivamente pesado, pero brinda una durabilidad alta a la pieza manufacturada.

Tabla 34

Ventajas y desventajas de la alternativa 1

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia y durabilidad	Alto costo por manufactura
No le afecta la corrosión	Alto costo por material
	La dureza del material está sobredimensionada para el uso que va a tener

Alternativa 2: Piezas fabricadas en hierro

Se plantea fabricar las tres piezas involucradas en el sistema en hierro, considerando que el material tiene un peso considerablemente mayor en relación al aluminio, pero ofrece una resistencia y durabilidad mayores.

Tabla 35*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia y durabilidad	Alto costo por manufactura Alto costo por material La dureza del material está sobredimensionada para el uso que va a tener

Alternativa 3: Piezas elaboradas por manufactura aditiva (impresión 3D)

Se plantea fabricar las tres piezas involucradas en ácido poliláctico (PLA) por medio de manufactura aditiva (impresión 3D), de tal manera que se ve reducido el peso y el costo por materiales.

Tabla 36*Ventajas y desventajas de la alternativa 3*

Ventajas	Desventajas
Reducción de costo de material	Material blando comparado con el aluminio y hierro
Facilidad de manufactura	
Peso reducido	
No le afecta la corrosión	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 37

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Piezas en aluminio		Piezas en hierro		Piezas impresas en PLA	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Durabilidad	40%	5	2	5	2	4	1.6
Facilidad de manufactura	40%	3	1.2	3	1.2	5	2
Costo	20%	2	0.4	3	0.6	5	1
Total			3.6		3.8		4.6

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la fabricación de las partes del subsistema de ingreso de piezas es la alternativa 3 que propone confeccionar las piezas por medio de manufactura aditiva en PLA.

Subsistema de giro

El subsistema de giro es el encargado de provocar que la base giratoria rote hasta la posición donde se encuentre una pieza metálica dentro de alguno de los receptáculos para ser manipulada por los robots SCARA. El subsistema está compuesto del motor que realiza el giro y el acople del motor con la base giratoria.

Para la selección del motor se consideraron las siguientes alternativas posibles:

Alternativa 1: Motor DC con caja reductora

Se propone utilizar un motor de corriente continua a 24V acoplado a una caja reductora para aumentar la fuerza y reducir velocidad del actuador que afecta a la base giratoria.

Tabla 38*Ventajas y desventajas de la alternativa 1*

Ventajas	Desventajas
Costo bajo	Se pierde rendimiento por la caja reductora
Fácil de controlar	
Torque elevado por la caja reductora	
Acople mecánico sencillo	

Alternativa 2: Motor a pasos

Se propone utilizar un motor a pasos NEMA 17 acoplado a la base giratoria por medio de un acople rígido de 5 a 8mm en el eje del motor.

Tabla 39*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Mayor precisión que el motor DC	Requiere driver para su funcionamiento
Facilidad de acondicionamiento mecánico	Se eleva el costo

Alternativa 3: Motor brushless

Se propone utilizar un motor brushless acoplado a la base giratoria por medio de un acople rígido de 5 a 8mm en el eje del motor.

Tabla 40*Ventajas y desventajas de la alternativa 3*

Ventajas	Desventajas
Mejor relación velocidad – torque	Costo elevado
Menor ruido	Requiere drivers para controlar el giro y la velocidad
Mayor rango de velocidad	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 41*Matriz de evaluación para las opciones presentada*

Criterio	Ponderación	Motor DC con caja reductora		Motor a pasos		Motor brushless	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Facilidad de control	30%	5	1.5	4	1.2	4	1.2
Facilidad de acondicionamiento mecánico	20%	5	1	4	0.8	4	0.8
Torque proporcionado	30%	4	1.2	4	1.2	5	1.5
Costo	20%	5	1	4	0.8	3	0.6
Total			4.7		4		4.1

En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la selección de motor para la base giratoria es el motor DC con caja reductora. A pesar de que las

tres opciones contempladas pueden solventar la necesidad de forma eficiente, el motor DC con caja reductora es el que mayor puntaje obtiene de la evaluación.

Para realizar la unión entre el motor seleccionado y la base giratoria se requiere un acople, el cual fue modelado en base a las dimensiones establecidas por los elementos involucrados en el sistema de alimentación. El acople puede ser fabricado en tres alternativas de material:

Alternativa 1: Acople fabricadas en aluminio

Se plantea fabricar el acople del motor y base giratoria en aluminio, considerando que el material no es excesivamente pesado, pero brinda una durabilidad alta a la pieza manufacturada.

Tabla 42

Ventajas y desventajas de la alternativa 1

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia y durabilidad	Se eleva el costo por manufactura y material
No le afecta la corrosión	Complejidad de manufactura
Peso ligero	

Alternativa 2: Piezas fabricadas en hierro

Se plantea fabricar el acople de la base giratoria en hierro, considerando que el material tiene un peso considerablemente mayor en relación al aluminio, pero ofrece una resistencia y durabilidad mayores.

Tabla 43*Ventajas y desventajas de la alternativa 2*

Ventajas	Desventajas
Mayor resistencia y durabilidad en comparación al aluminio	Costo elevado por el material
	Complejidad en la manufactura
	Se eleva el peso considerablemente

Alternativa 3: Piezas elaboradas por manufactura aditiva (impresión 3D)

Se plantea fabricar el acople de la base giratoria en ácido poliláctico (PLA) por medio de manufactura aditiva (impresión 3D), de tal manera que se ve reducido el peso y el costo por materiales.

Tabla 44*Ventajas y desventajas de la alternativa 3*

Ventajas	Desventajas
Reducción de costo de material	Material blando para el trabajo al que está destinado
Facilidad de manufactura	
Peso reducido	
No le afecta la corrosión	

Considerando los pros y contras de cada alternativa, se realiza una matriz de evaluación para las opciones presentadas, y tomar una decisión de la alternativa adecuada.

Tabla 45

Matriz de evaluación para las opciones presentadas

Criterio	Ponderación	Acople en aluminio		Acople en hierro		Acople impreso en PLA	
		Ca	Ep	Ca	Ep	Ca	Ep
Durabilidad	50%	5	2.5	5	2.5	3	1.5
Facilidad de manufactura	30%	4	1.2	3	0.9	5	1.5
Costo	20%	4	0.8	3	0.6	5	1
Total			4.5		4		4

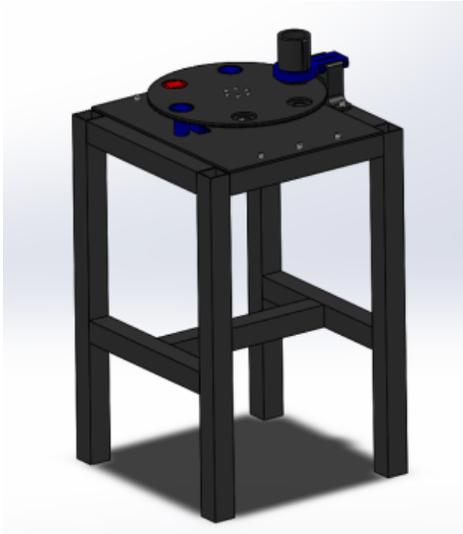
En base a la matriz de ponderación, se puede apreciar que la opción adecuada para la fabricación del acople del motor con la base giratoria es la alternativa 1 que propone confeccionar las piezas en aluminio.

Cálculos de selección

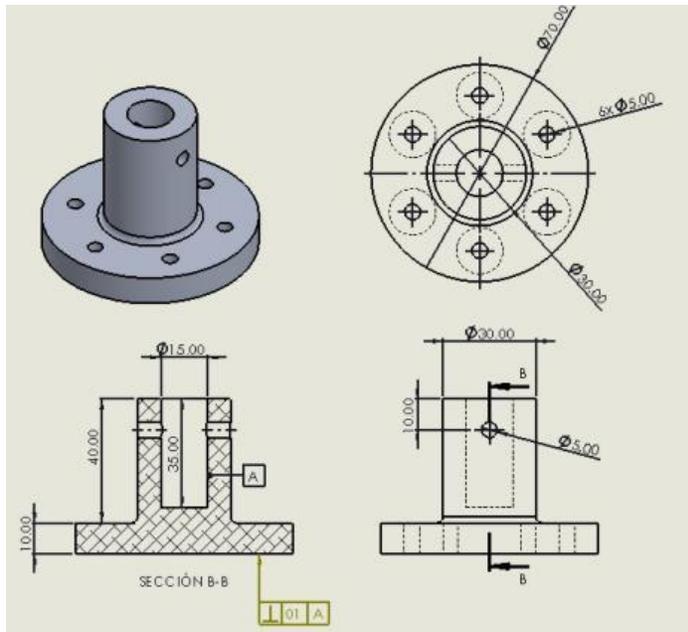
Como se ve en la figura 54 en base a las alternativas seleccionadas se realizan los diseños en software de modelado 3D, de tal manera que permita visualizar los esfuerzos que van a realizar cada pieza, de tal manera que permita determinar las dimensiones adecuadas para soportar las cargas necesarias. La simulación de las cargas se realiza para el conjunto de piezas que involucran la base giratoria con todos sus receptáculos ocupados y el acople que permite la conexión de esta con el motor DC. En conjunto, el modelo 3D del sistema completo se presenta a continuación:

Figura 54

Sistema dispensadora de alimento



El acople diseñado en aluminio debe poseer las dimensiones que permitan acoplarse de manera adecuada a la base circular y al eje de salida de la caja reductora del motor DC utilizado; estas dimensiones se visualizan en la siguiente figura:

Figura 55*Acople de aluminio*

En las figuras 56, 57 y 58 se ven los valores de esfuerzo que sufre esta pieza se pueden visualizar en el entorno de simulación de estudio lineal, que presenta en escala de colores los esfuerzos calculados de Von Mises, factor de seguridad de la pieza y desplazamiento.

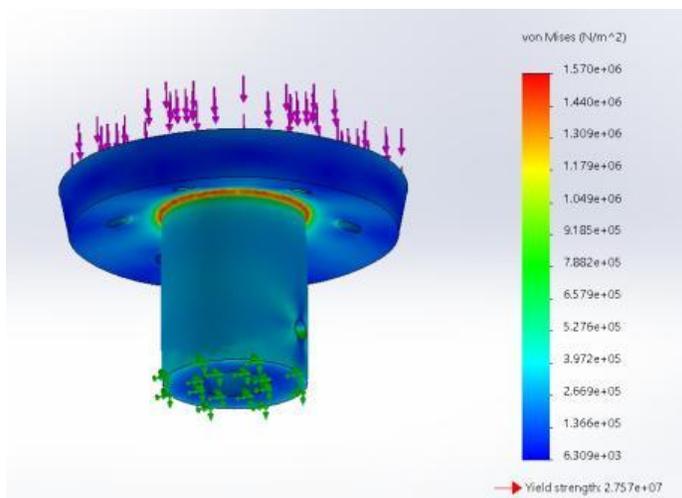
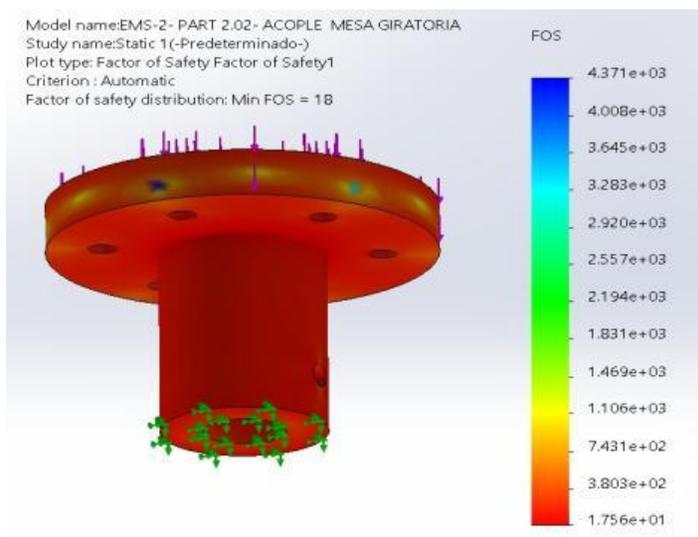
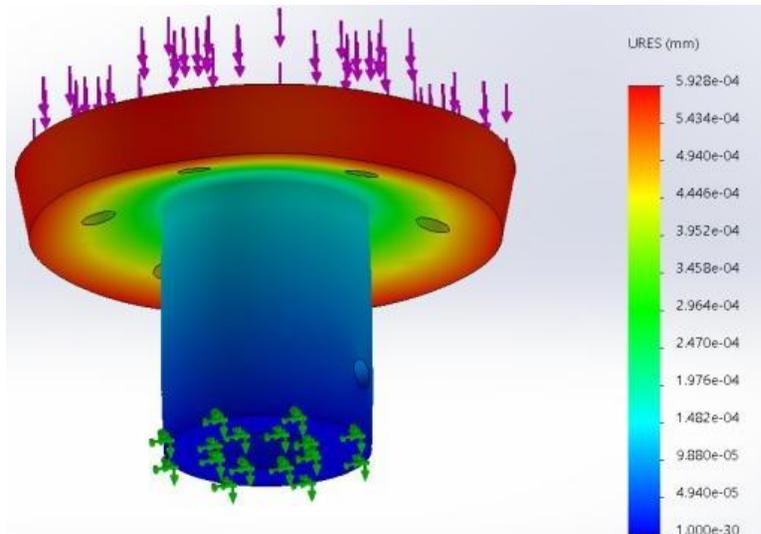
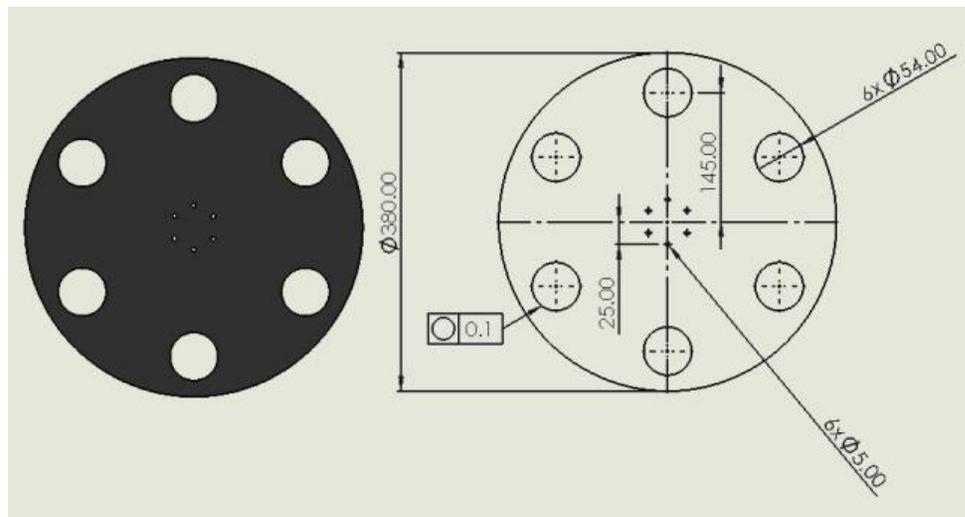
Figura 56*Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el acople***Figura 57***Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el acople*

Figura 58*Análisis de deformaciones en el acople*

La base giratoria debe permitir la recepción de piezas en sus receptáculos, cuyas dimensiones son de 6mm de alto y 5cm de diámetro. Esta base consta de dos piezas que se unen entre sí para formar los sitios donde ingresan las piezas. Esta plataforma fue elaborada por corte láser en tablero MDF de grosor de 5mm. Las dimensiones de las bases se muestran en las siguientes figuras:

Figura 59*Medidas de base de MDF*

Los valores de esfuerzo que sufre esta pieza se pueden visualizar en el entorno de simulación de estudio lineal, que presenta en escala de colores los esfuerzos calculados de von Mises, el factor de seguridad de la pieza y su desplazamiento.

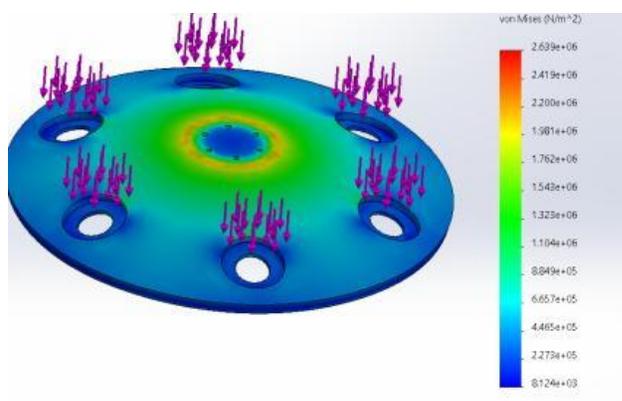
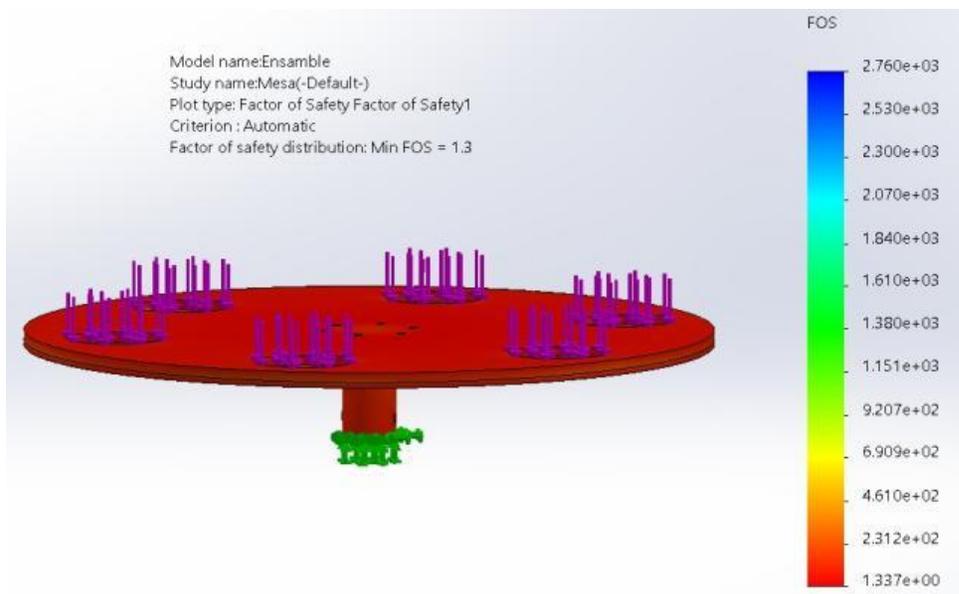
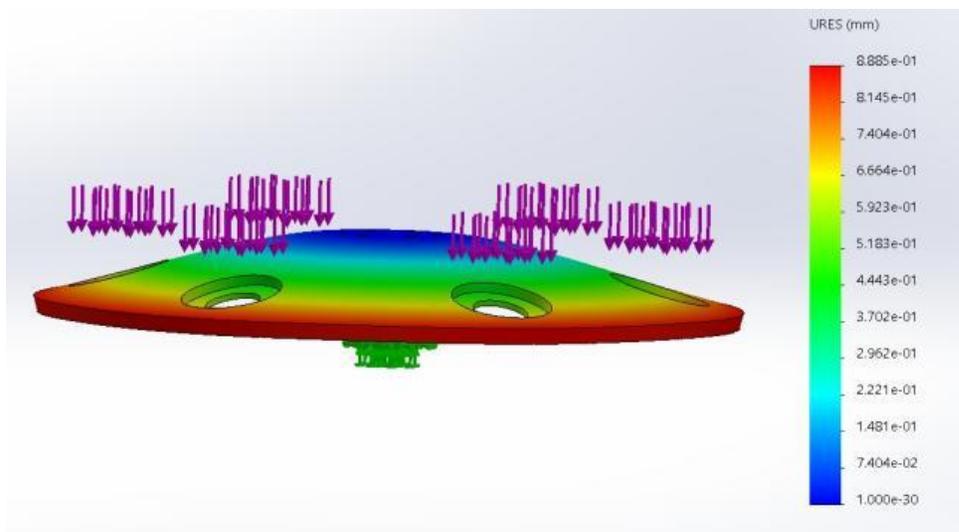
Figura 60*Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la base*

Figura 61

Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la base

**Figura 62**

Análisis de desplazamiento en la base

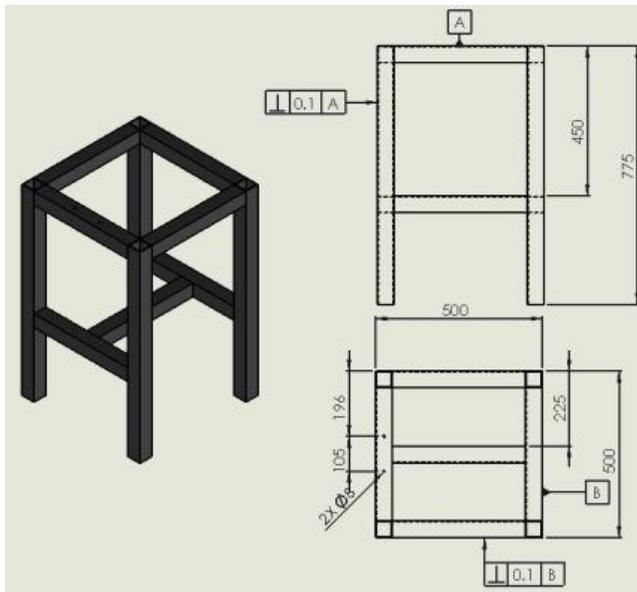


La base giratoria se sostiene sobre una estructura metálica unida por soldadura de electrodo revestido. Esta estructura debe soportar la carga de la mesa giratoria, las piezas

metálicas y el motor DC. Esta plataforma fue elaborada en tubo metálico cuadrado de 50mm y de 3mm de espesor, las dimensiones de la mesa se muestran a continuación:

Figura 63

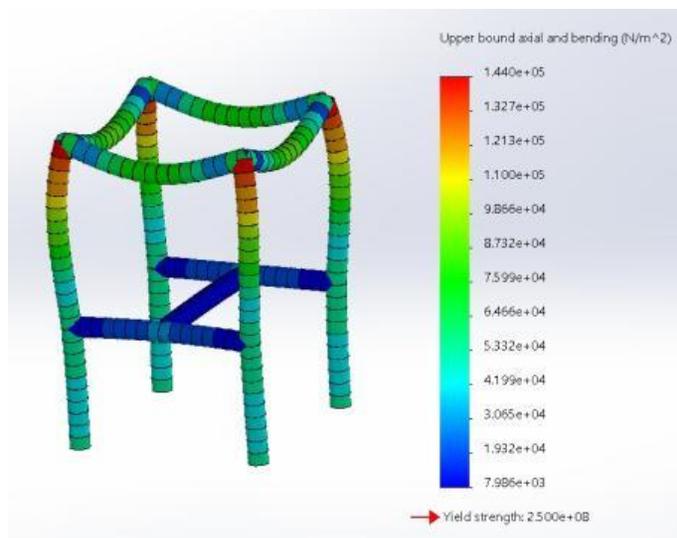
Medidas de estructura de soporte



En las figuras 64 y 65 se muestra las cargas aplicadas las cargas mencionadas, se procede a calcular los esfuerzos que soporta la estructura y el factor de seguridad que presenta la mesa en base a los valores obtenidos por el cálculo de Von Mises.

Figura 64

Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la estructura

**Figura 65**

Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en la estructura

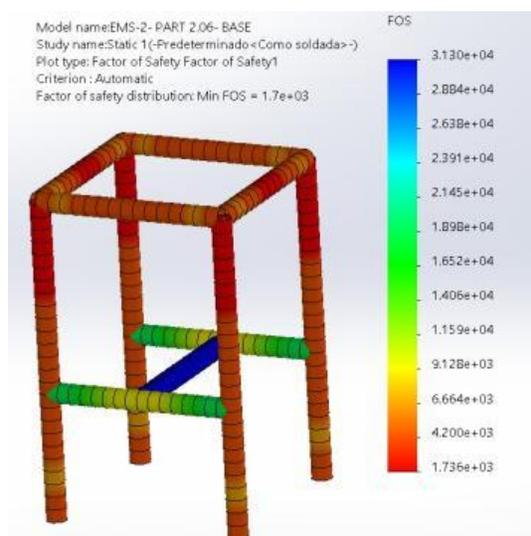
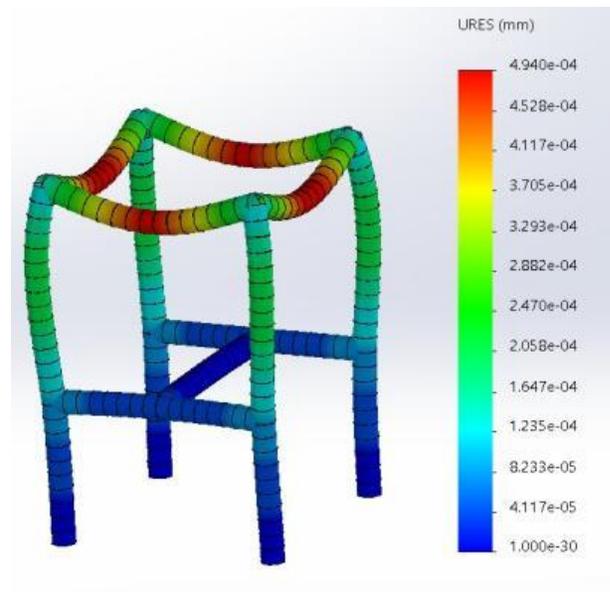


Figura 66*Análisis de desplazamientos en la estructura*

La base giratoria cuenta con un sistema de dispensación de piezas metálicas para los receptáculos de la plataforma. Por las dimensiones establecidas el sistema de dispensación cuenta con cabida para 16 piezas. Las piezas que conforman el sistema deben soportar la fuerza de rozamiento que existe entre las piezas metálicas y la plataforma giratoria. Estas piezas fueron manufacturadas en PLA por impresión 3D. A continuación, se puede apreciar las dimensiones de las piezas involucradas.

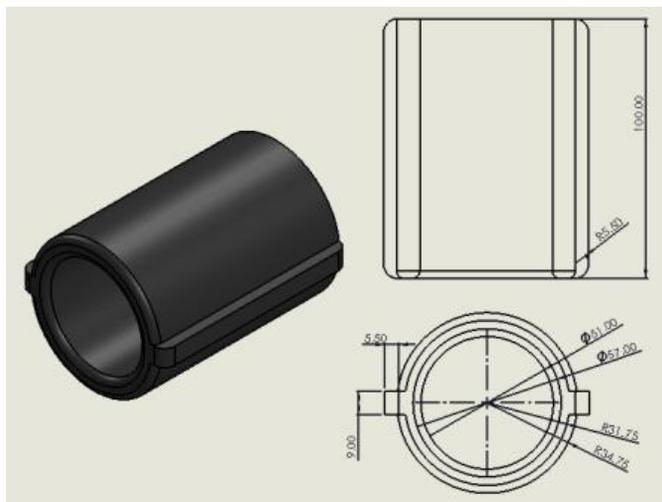
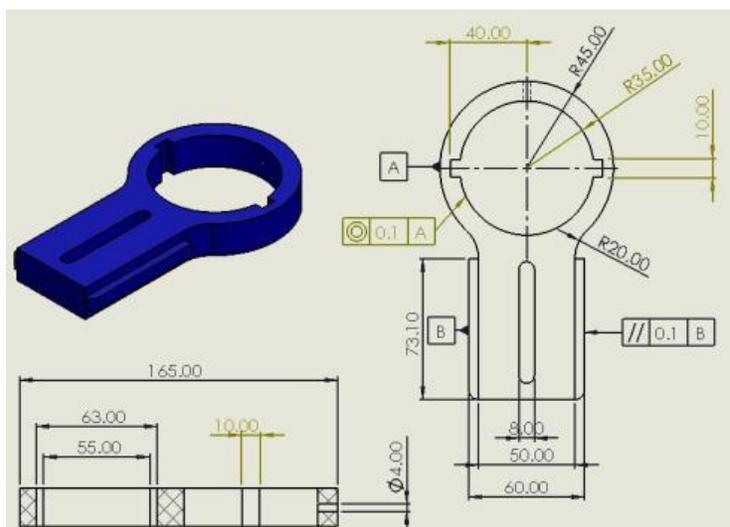
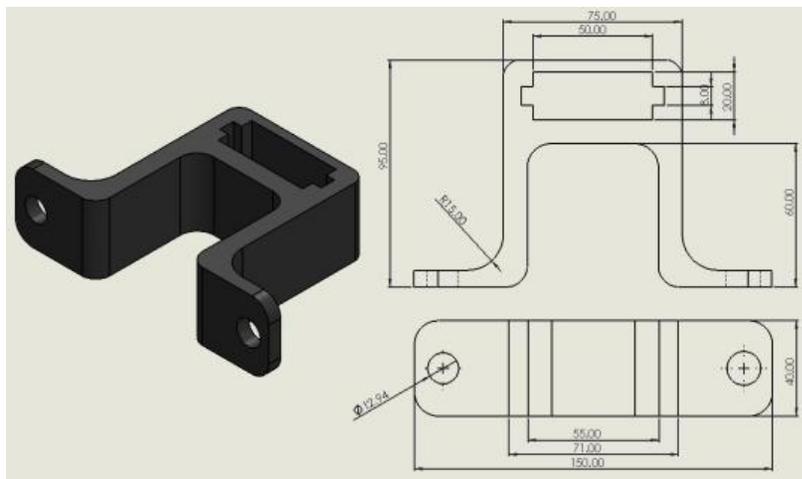
Figura 67*Medidas de contenedor***Figura 68***Medidas del bastidor*

Figura 69*Medidas del bastidor*

En las figuras 70 y 71 se muestran las cargas aplicadas mencionadas, se procede a calcular los esfuerzos que soporta la estructura y el factor de seguridad que presenta la mesa en base a los valores obtenidos por el cálculo de Von Mises.

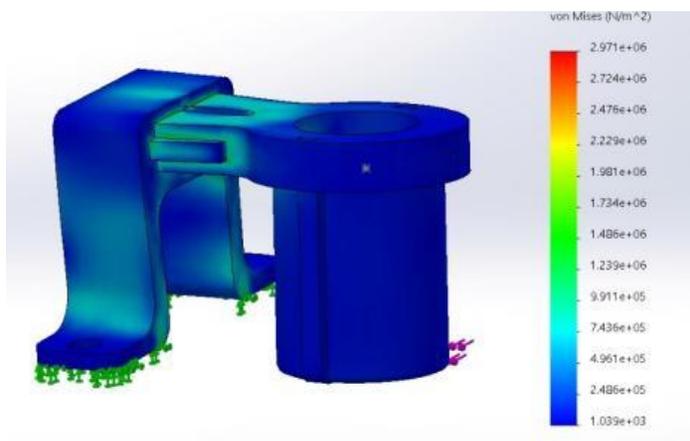
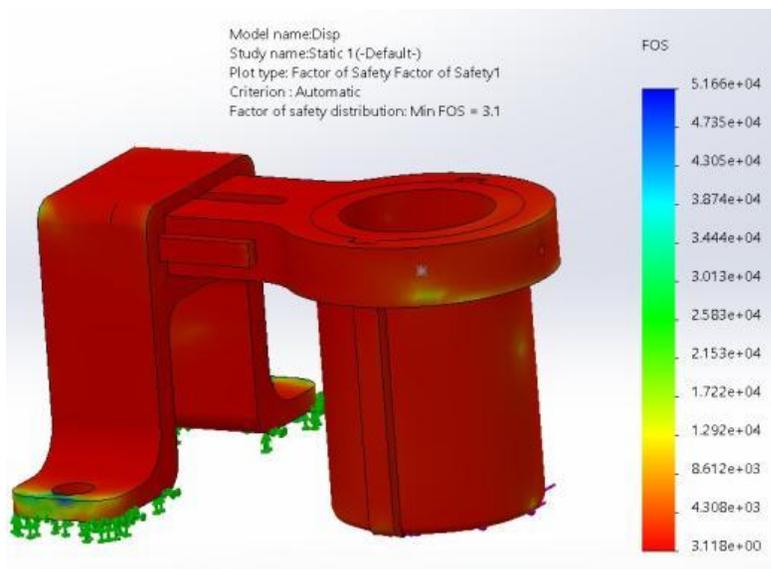
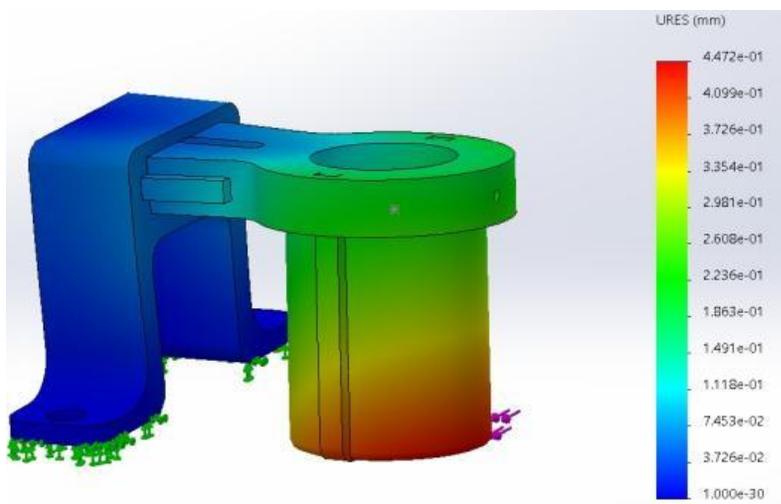
Figura 70*Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el bastidor*

Figura 71

Análisis de esfuerzo y factor de seguridad en el bastidor

**Figura 72**

Análisis de desplazamientos en el bastidor



Métodos y criterios de validación del diseño.

La estructura metálica de la mesa, va a ser validada por la especificación 70 de la CMAA (Crane Manufacturers Association of America). Que la deflexión máxima de una viga es

$$\text{la } \sigma_{max} = \frac{L}{888}.$$

Mientras, que, para la validación de los otros elementos de las mesas, se utilizara la validación del software con el método de mallado adaptativo tipo H con un target del 98% e iteración de 3 para la convergencia.

Figura 73

Método de validación de acople del sistema de dispensación con los parámetros de mallado adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos para convergencia con su respectivo mallado

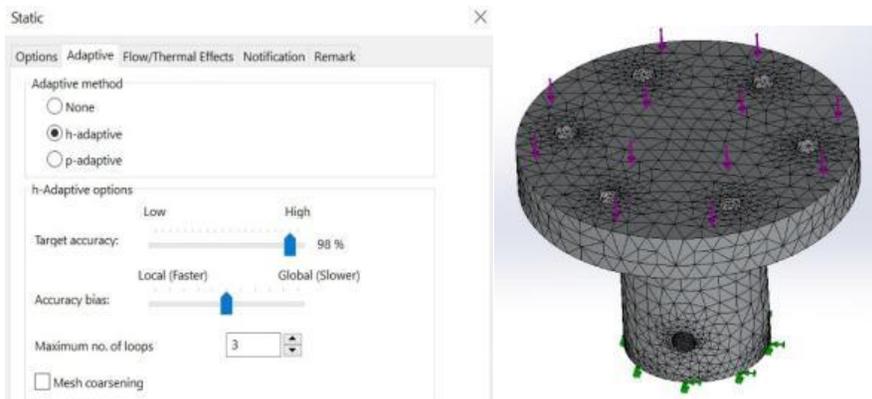


Figura 74

Resultado de la convergencia del método adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos del acople

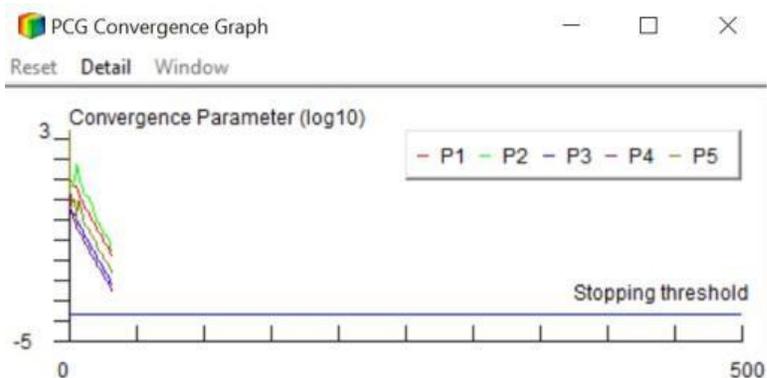


Figura 75

Método de validación del brazo de alimentación del sistema de dispensación con los parámetros de mallado adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos para convergencia con su respectivo mallado

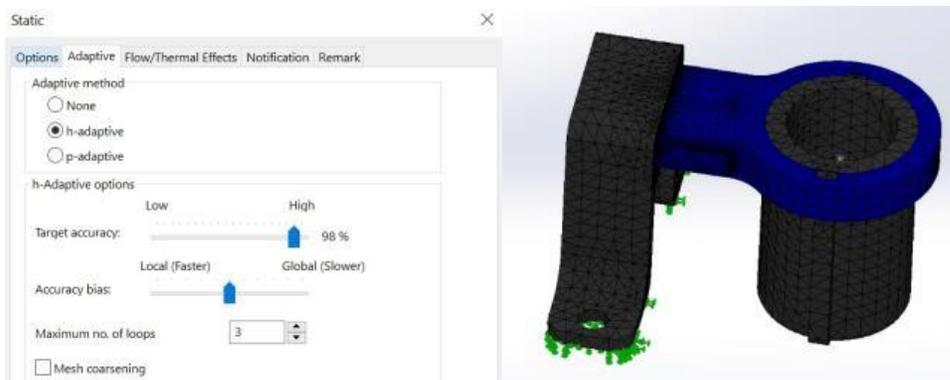
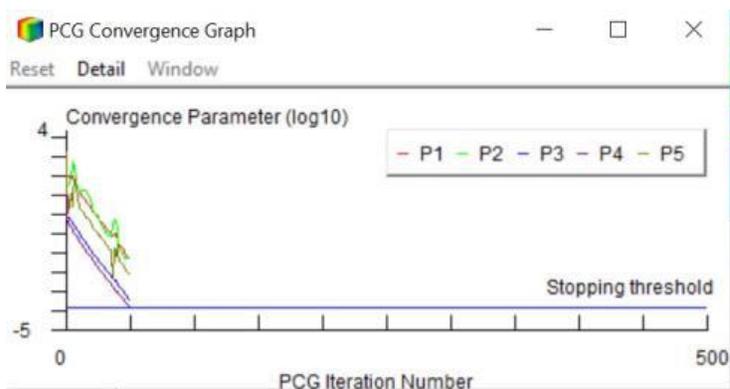


Figura 76

Resultado de la convergencia del método adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos del brazo de alimentación del sistema de dispensación

**Figura 77**

Método de validación de la mesa del sistema de dispensación con los parámetros de mallado adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos para convergencia con su respectivo mallado

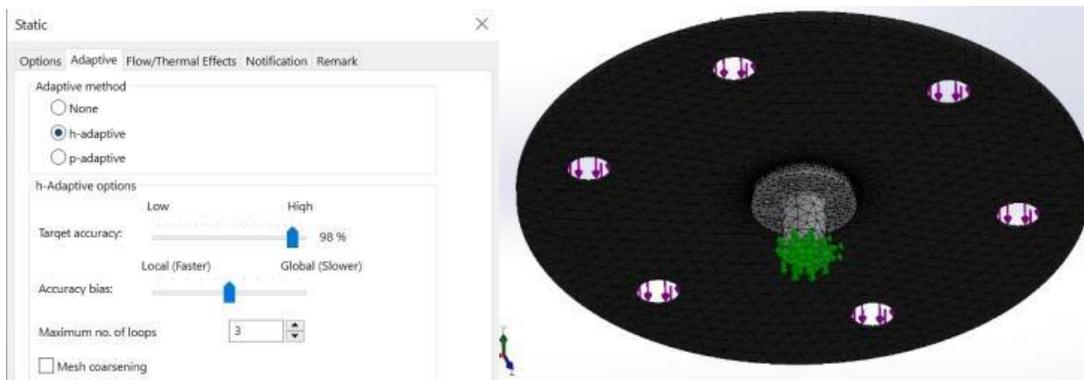
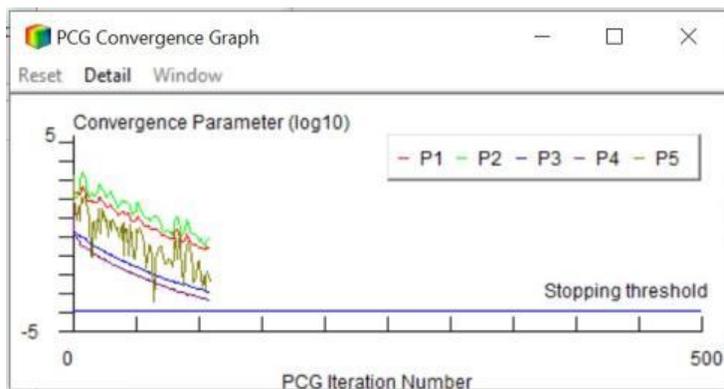


Figura 78

Resultado de la convergencia del método adaptativo tipo h con un target de 98% y una iteración de 3 intervalos de la mesa del sistema de dispensación



En la Figura 73, Figura 75, Figura 77 se puede ver, los criterios aplicados y parámetros asignados al software para obtener la Figura 74, Figura 76, Figura 78, donde se observa que los valores convergen es decir el modelo diseñado es aceptable para su construcción.

El resultado, de la deflexión obtenido de la estructura fue $\sigma = 0.337$ y utilizando el criterio de deflexión máxima $\sigma_{max} = 0.506$ con lo que se puede concluir que el diseño es correcto ya que cumple el criterio de $\sigma < \sigma_{max}$.

Observando la vista superior se puede decir, que en la base constantemente se encuentran 6 piezas metálicas circulando, por lo que se calcula su peso; la masa de cada ficha es de 12 gramos con los que puede decir que tenemos un peso de 0.072 Kilogramos.

La rueda soporta todo el peso de piezas, además se debe considerar la masa de los elementos que forman la mesa giratoria, adicionalmente la fuerza de rozamiento que existe entre la mesa giratoria y las piezas que se encuentran en el sistema de alimentación teniendo una masa total de 0.856 Kilogramos.

Se prevé que la mesa gire a 30RPM, por lo que el número de piezas que se obtienen por minuto que pueden ser manipulables por los robots SCARA son:

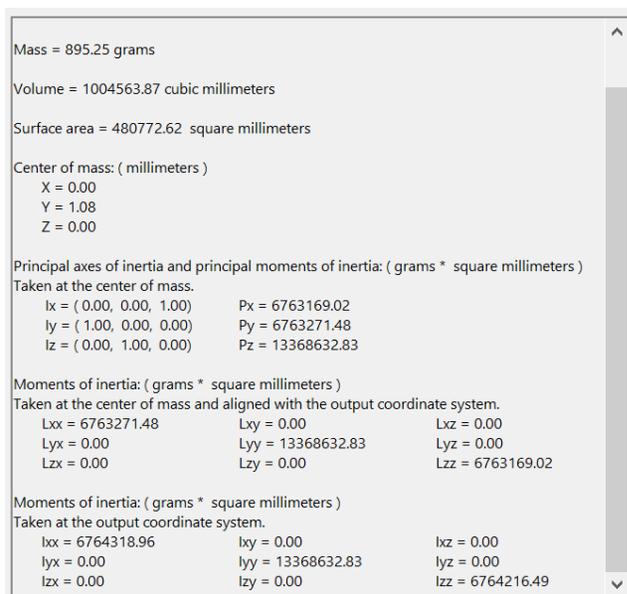
$$RPM = \frac{\#Piezas\ por\ minuto}{\#Receptáculos} \quad (3)$$

El número de piezas es aproximado, puesto que no se considera el tiempo que le toman a los robots SCARA en posicionarse y activar el efector final para que recoja la pieza en el receptáculo correspondiente.

La inercia del sistema de giro se calcula por la herramienta de modelado matemático, que muestra el resultado a continuación:

Figura 79

Detalle de análisis



La energía requerida para mover las piezas de la base giratoria que requiere el motor a seleccionar se calcula a partir de la velocidad angular y la inercia, adicionalmente del torque que provoca la fuerza de rozamiento de las piezas:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 + \mu N r = \frac{1}{2} \cdot 0.06 \text{kgm}^2 \cdot \left(3.14 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)^2 + 0.4 \cdot 1.9 \cdot 0.19 = 0.43 \text{Nm} \quad (4)$$

El motor requiere de una caja reductora, puesto que la velocidad supera las 30RPM, considerando que la caja reductora se basa en un tornillo sinfín – corona, la eficiencia es de 0.25 aproximadamente, se calcula la potencia del motor:

$$P \approx 9W$$

En base a los cálculos se selecciona el motor.

Tabla 46

Descripción del producto

Descripción del producto	
Numero de Item	HH31085
OEM No	9390453023
Rango de Voltaje	12V/24V
Voltaje Nominal	27V
Corriente nominal	1.5 A - 1 ^a
Potencia	35 W
Torque nominal	12Nm
Aplicación	Mercedes Benz 113,1116

Figura 80*Motor BOCH Características técnicas*

Nota. Tomada de Bosch (2010).

Modelado de las plantas

En el presente trabajo se encuentran involucrados sistemas que permiten la manipulación de las piezas metálicas distribuidas, además de un sistema que movilizan estas piezas sobre una plataforma giratoria. Los sistemas pueden ser modelados de tal manera que pueda visualizarse la respuesta que presentan en el dominio del tiempo durante su estado transitorio y estado estacionario, una vez se estabiliza el valor deseado de salida. Al ser sistemas complejos en lo que concierne a mediciones de inercias y valores intrínsecos de los embobinados de los motores, se determinó que el método ideal para la obtención de las funciones de transferencia que describen los sistemas es por medio de la identificación, tomando valores de salida asignando señales de trenes de pulso o escalonadas para realizar el proceso de identificación.

La metodología utilizada para la toma de datos fue determinar valores dentro de rango que pueden alcanzar los actuadores dentro de los sistemas en los que se encuentran involucrados, y enfrentar a los actuadores frente a señales con los siguientes valores. Para los motores encargados de realizar el giro de los grados de libertad Q_1 y Q_2 se utilizó una señal

escalonada que cambia en el transcurso del tiempo entre los valores de 0° , 45° , 90° , 135° y 180° ; para el motor lineal responsable del grado de libertad Q_3 se utiliza una función de escalón que cambia entre 0cm, 5cm, 10cm, 20cm; finalmente para el motor encargado del giro de la mesa donde se encuentran las piezas metálicas, se utiliza una señal de tren de pulsos variante en el tiempo entre los valores de 0 y 12V.

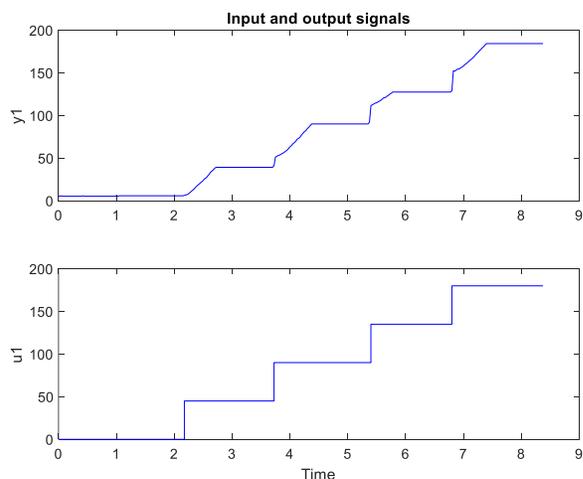
Motores para el movimiento angular (Q_1 , Q_2)

Son los encargados de realizar el posicionamiento del efector final sobre el plano superior, por lo que las salidas que se desea conocer son los ángulos que manejan. Como señal de entrada se estableció una señal escalonada que asciende en 45° de forma equidistantemente hasta alcanzar los 180° .

Se toman las medidas de ángulos por medio del circuito resistivo implementado para ambos motores, de los que se obtienen las siguientes señales y la señal escalonada que se utiliza de punto de referencia para la identificación.

Figura 81

Ingreso de datos tomados y filtrados por ident



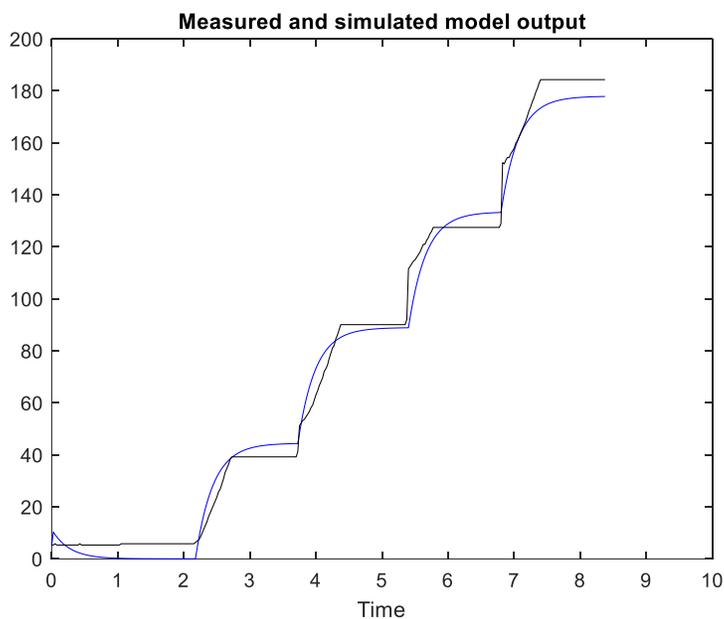
Una vez ingresados los valores de entrada y salida, se procede a realizar el proceso de aproximación a un modelo de función de transferencia, de tal manera que el porcentaje de aproximación sea aceptable. Se considera un porcentaje adecuado cuando supera el valor del coeficiente de correlación supera el 60%. El software matemático realiza el proceso de aproximación y arroja la siguiente función de transferencia, que presenta un porcentaje de aproximación del 91.06%, por lo que se la considera una respuesta confiable.

$$F(s) = \frac{1.267 \cdot 10^4}{s^2 + 3370s + 1.281 \cdot 10^4} \quad (4)$$

La herramienta de aproximación permite visualizar como la salida de esta función de transferencia realiza el seguimiento (tracking) a la señal obtenida de la salida del circuito resistivo para la toma de valores.

Figura 82

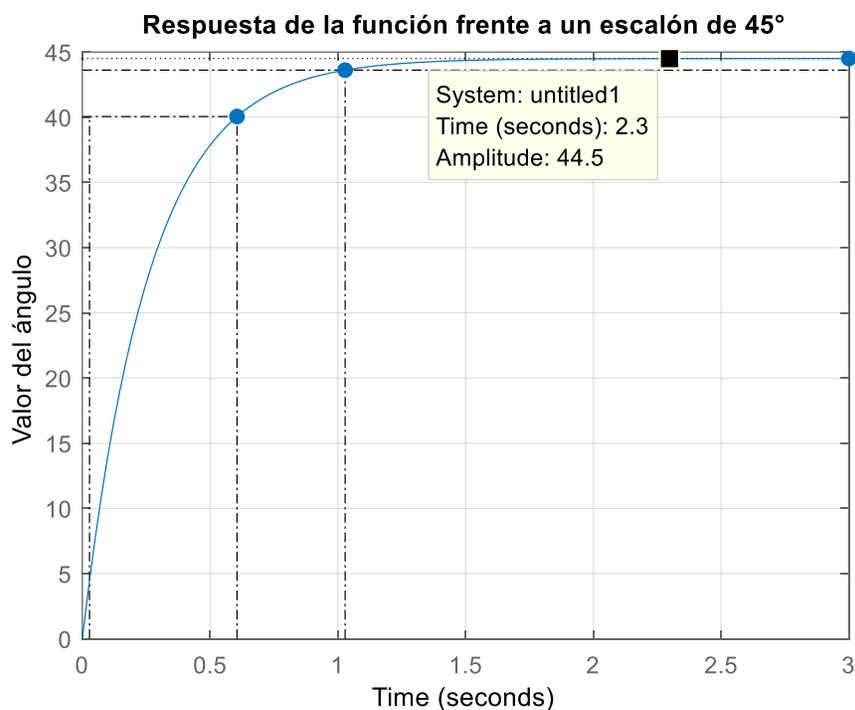
Curva característica



A modo de comparativa, se realiza una comprobación de la fiabilidad de la función de transferencia obtenida enfrentándola contra un escalón de 45°, donde se espera que la respuesta se estabilice en 45°, con la presencia de error aceptable de hasta el 10%.

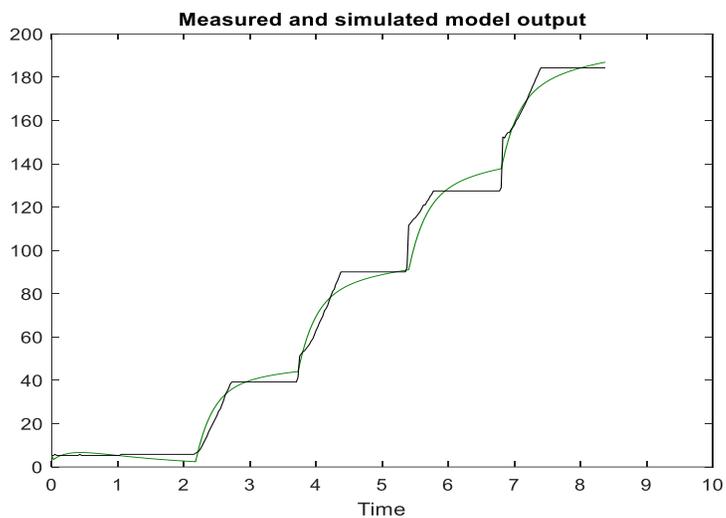
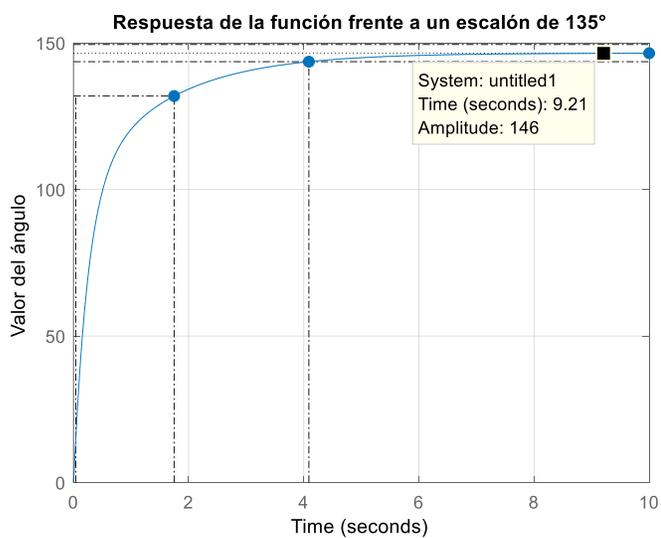
Figura 83

Representación de repuesta de escalón



$$e_p = \frac{|45-44.5|}{45} \cdot 100\% = 1.11\% \quad (4)$$

De forma similar, se realiza el proceso para el motor que controla el grado de libertad Q_2 ; se realizó la toma de datos, la aproximación por software de identificación, la comparativa de la señal de salida real con la obtenida de la aproximación, y la verificación de la confiabilidad de la función de transferencia al enfrentarla con una señal de escalón:

Figura 84*Curva característica***Figura 85***Representación de repuesta de escalón*

$$e_p = \frac{|135 - 146|}{135} \cdot 100\% = 8.15\%$$

A pesar de haber incrementado el valor de error, se encuentra dentro del rango de confianza donde el error es menor al 10%, por lo que la salida de la función de transferencia obtenida por identificación es aceptable.

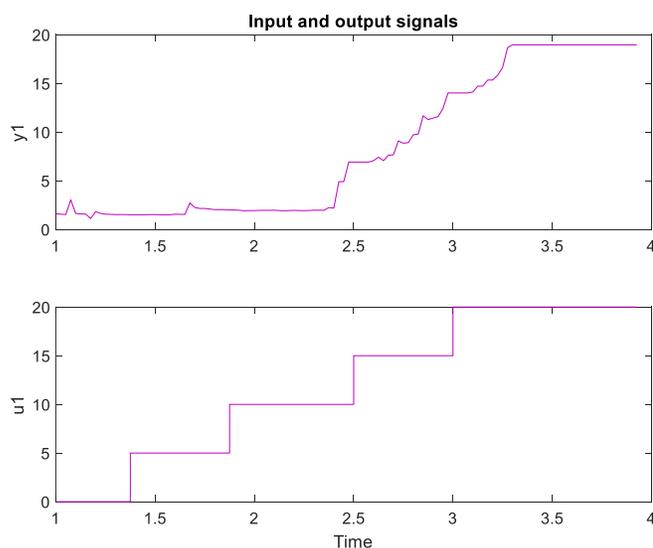
Motor lineal del efector final (Q_3)

Es el encargado de realizar el posicionamiento del efector final en el eje vertical, por lo que la salida que se desea conocer es la longitud del vástago que ha descendido. Como señal de entrada se estableció una señal escalonada que asciende desde 0 en 5cm de forma equidistantemente hasta alcanzar los 20.

Se toman las medidas de las longitudes obtenidas por medio del circuito resistivo con el que cuenta el propio motor lineal, y los valores se muestran en la gráfica siguiente, donde se realiza la comparativa entre los valores obtenidos y la señal escalonada de posición.

Figura 86

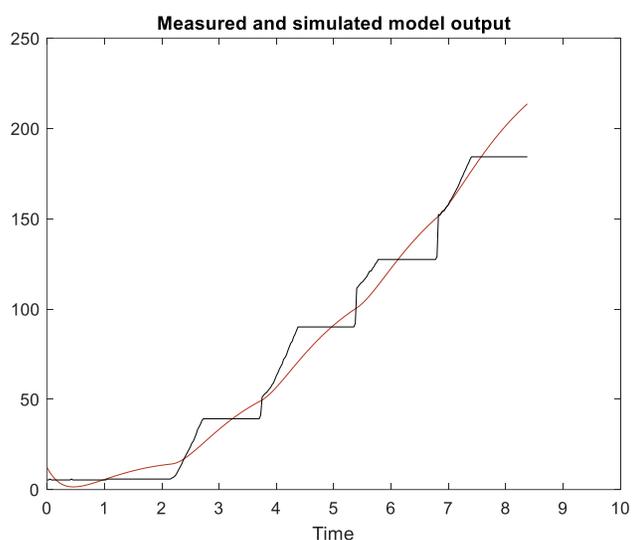
Ingreso de datos tomados y filtrados por ident



La herramienta de aproximación permite visualizar como la salida de esta función de transferencia realiza el seguimiento (tracking) a la señal obtenida de la salida del circuito resistivo para la toma de valores.

Figura 87

Curva característica

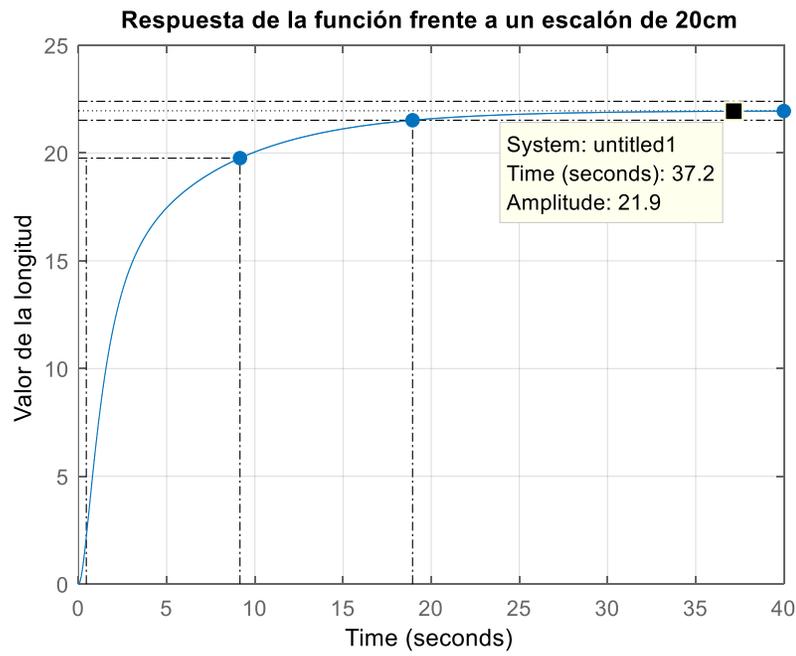


De la herramienta de identificación se obtiene la siguiente función de transferencia que presenta el 75.58% de aproximación. Como el valor es superior al 60%, se la considera aceptable.

A modo de comparativa, se realiza una comprobación de la fiabilidad de la función de transferencia obtenida enfrentándola contra un escalón de 20cm, donde se espera que la respuesta se establezca en 20cm, con la presencia de error aceptable de hasta el 10%.

Figura 88

Representación de repuesta de escalón



$$e_p = \frac{|21.9 - 20|}{20} \cdot 100\% = 9.5\%$$

El valor de error porcentual se encuentra dentro del rango de confianza donde el error es menor al 10%, por lo que la salida de la función de transferencia obtenida por identificación es aceptable.

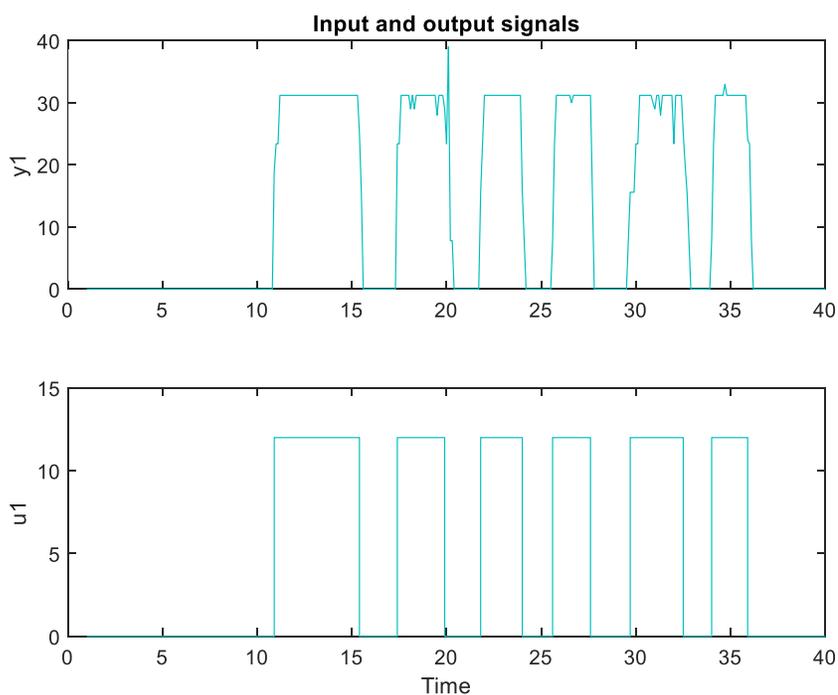
Motor de la mesa rotatoria (Q_3)

Es el encargado de realizar el posicionamiento de las piezas metálicas de tal forma que sean accesibles para los dos robots SCARA. En vista que existe un control on – off que detiene la mesa cuando la posición es adecuada, la variable de interés para siguiente caso es la velocidad angular del motor, medidas en revoluciones por minuto (RPM).

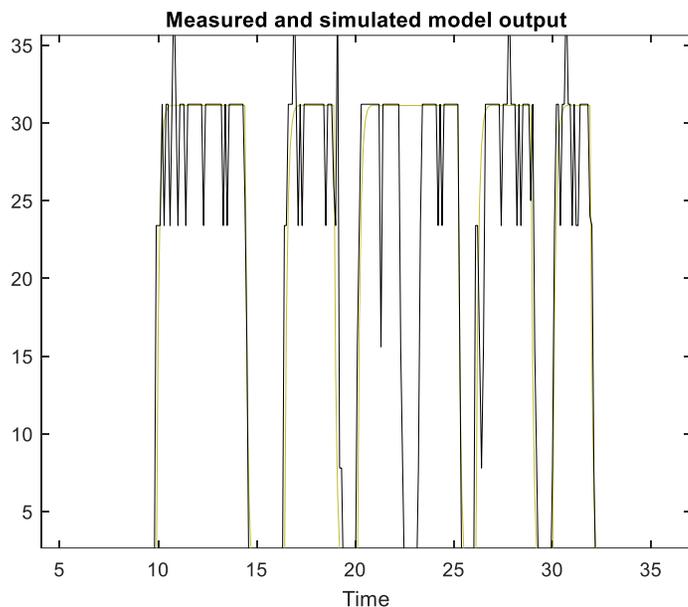
Se toman las medidas de las longitudes obtenidas por medio de un encoder, y a través de una DAQ manipulando interrupciones de flanco ascendente se calcula el valor de la velocidad angular a la que el motor se encuentra, y los valores se muestran en la gráfica siguiente, donde se realiza la comparativa entre los valores obtenidos y la señal escalonada de posición. La señal utilizada fue un tren de pulsos que varía en el tiempo entre 0 y 12V.

Figura 89

Ingreso de datos tomados y filtrados



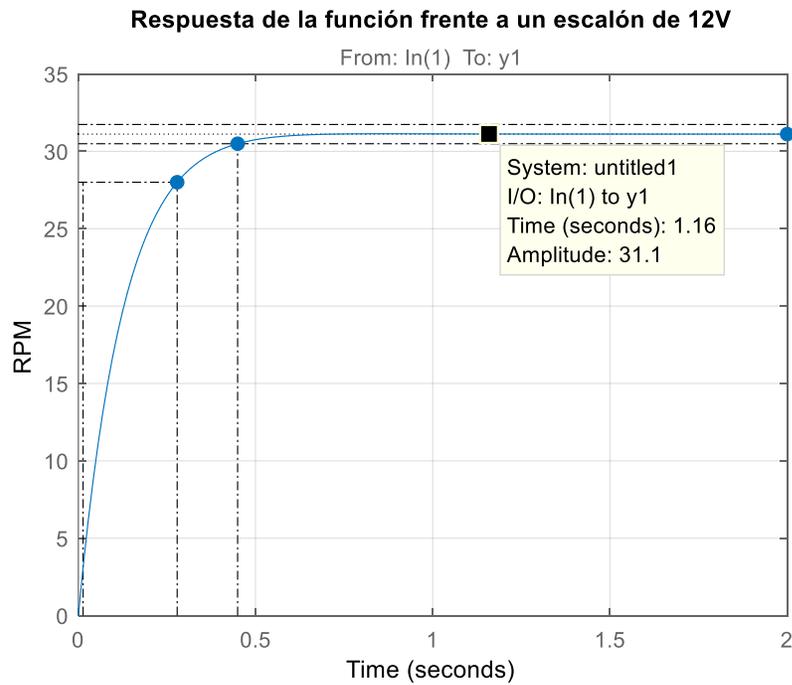
La herramienta de aproximación permite visualizar como la salida de esta función de transferencia realiza el seguimiento (tracking) a la señal obtenida de la salida del encoder acoplado al eje del motor.

Figura 90*Salida del Modelamiento*

De la identificación se obtiene la siguiente función de transferencia, que presenta un 77.67% de aproximación, que se considera aceptable para el caso, puesto que es superior al 60%.

A modo de comparativa, se realiza una comprobación de la fiabilidad de la función de transferencia obtenida enfrentándola contra un escalón de 45°, donde se espera que la respuesta se estabilice en 45°, con la presencia de error aceptable de hasta el 10%.

A modo de comparativa, se realiza una comprobación de la fiabilidad de la función de transferencia obtenida enfrentándola contra un escalón de 45°, donde se espera que la respuesta se estabilice en 45°, con la presencia de error aceptable de hasta el 10%.

Figura 91*Representación de repuesta de escalón*

$$e_p = \frac{|31.1 - 30|}{30} = 3.67\%$$

Se esperaba un valor de 30RPM al ser alimentado con 12V, por lo que se tiene un error porcentual de 3.67%, que está dentro del rango de aceptación del error.

Tabla 47*Tabla resumen de los datos obtenidos*

Motor	Función de transferencia	Aproximación
Articulación 1 (Q1)	$\frac{12670}{s^2 + 3370s + 12810}$ (4)	91.06%,
Articulación 2 (Q2)	$\frac{1319s + 1243}{s^3 + 415.08s^2 + 1956s + 1145}$ (5)	91.06%,
Articulación 3 (Q3)	$\frac{2.806s + 0.7092}{s^3 + 3.823s^2 + 3.196s + 0.4263}$ (6)	75.58%
Motor Mesa	$\frac{20.34s + 118.6}{s^2 + 13.39 + 45.75}$ (7)	77.67%
Motor Banda	$\frac{20.34s + 118.6}{s^2 + 13.39 + 45.75}$ (8)	77.67%

Figura 92*Motor Q1*

Motor del GDL Q1

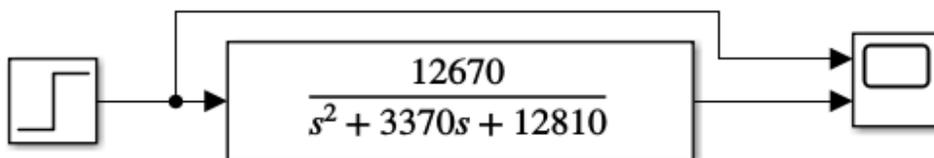
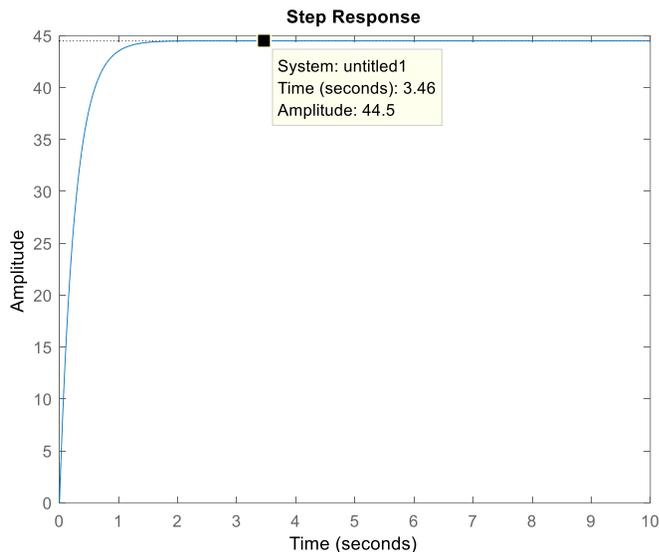


Figura 93

Representación del lazo abierto de Q1



En base a la gráfica se determina que la función de transferencia del motor DC que controla el grado de libertad Q1 presenta un error despreciable de 1% aproximadamente, por lo que se puede concluir que las correcciones que debe realizar el sistema de control de posición no son para errores considerables. Adicionalmente se puede determinar que no existen sobre picos en la curva, y el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 2 segundos.

Figura 94

Motor Q2

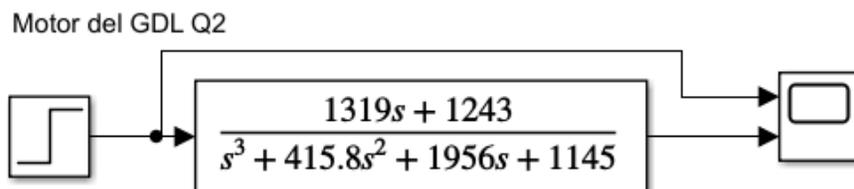
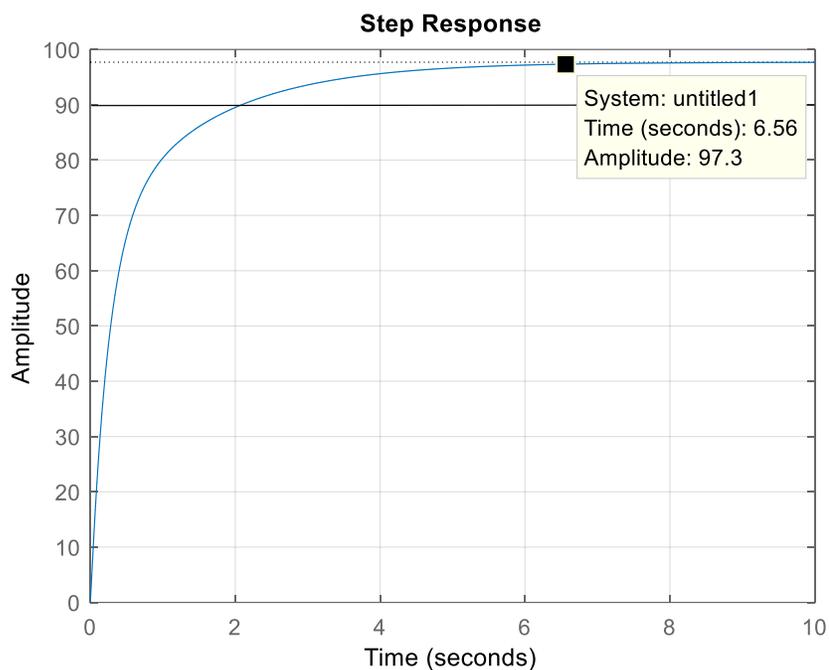


Figura 95

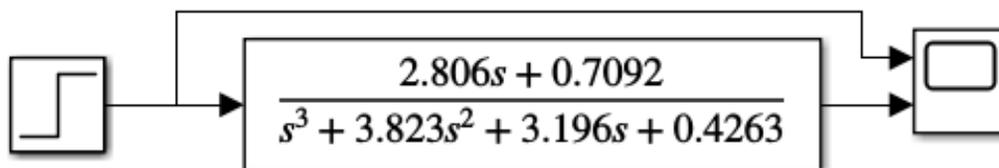
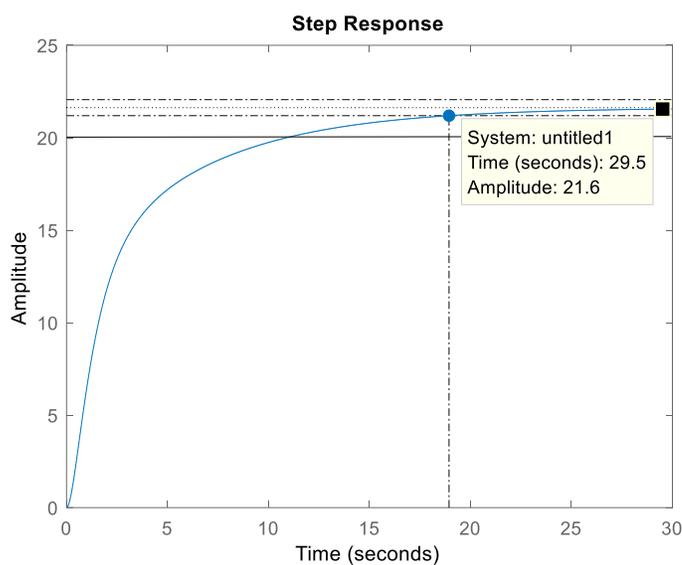
Representación del lazo abierto de Q2



En base a la gráfica se determina que la función de transferencia del motor DC que controla el grado de libertad Q2 presenta un error considerable del 8% aproximadamente, por lo que se puede concluir que las correcciones que debe realizar el sistema de control de posición son notorias en la curva, aunque dentro de los parámetros de diseño se puede aceptar un máximo del 10% de error en estado estacionario. Adicionalmente se puede determinar que no existen sobrepicos en la curva, y el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 5 segundos.

Figura 96*Motor Q3*

Motor del GDL Q3

**Figura 97***Representación del lazo abierto de Q3*

En base a la gráfica se determina que la función de transferencia del motor DC lineal que controla el grado de libertad Q3 presenta un error considerable del 8% aproximadamente, por lo que se puede concluir que las correcciones que debe realizar el sistema de control de posición son notorias en la curva, aunque dentro de los parámetros de diseño se puede aceptar un máximo del 10% de error en estado estacionario. Adicionalmente se puede determinar que

no existen sobrepicos en la curva, y el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 20 segundos para un escalón de 20 cm.

Figura 98

Motor Banda y base giratoria

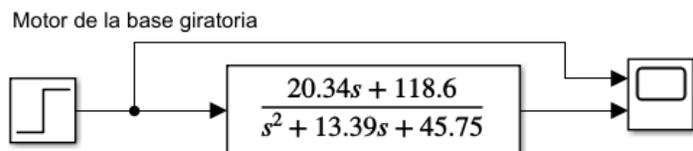
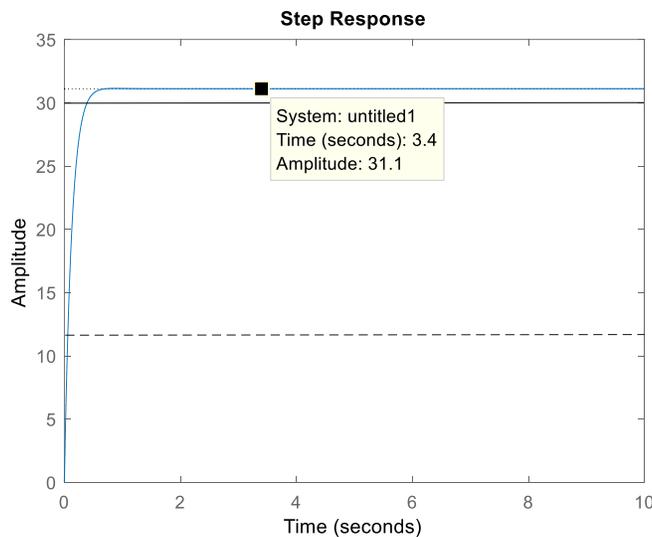


Figura 99

Representación del lazo abierto de motor de banda



En base a la gráfica se determina que la función de transferencia del motor DC que mueve la mesa circular presenta un error considerable del 3%, por lo que se puede concluir que las correcciones que debe realizar el sistema de control de velocidad no son considerables. Adicionalmente se puede determinar que no existen sobrepicos en la curva, y el tiempo de

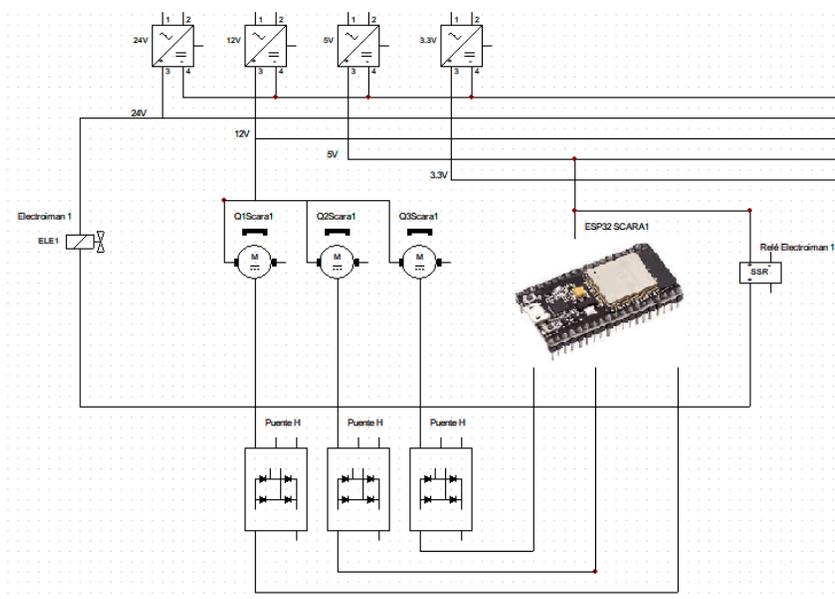
establecimiento es de aproximadamente 1 segundo para un escalón de 12V, que representa una velocidad de 30RPM.

Conexiones Eléctricas

La figura 100 es la representación de la conexión eléctrica de los dos SCARAs, donde se puede ver que el control se realiza a través de la ESP32, las fuentes de 12 y 24 voltios alimentan respectivamente a cada elemento, los actuadores que se van a conectar son 2 motores DC, un motor lineal y un electroimán, además los potenciómetros van a retroalimentar la señal de la posición para la ESP32.

Figura 100

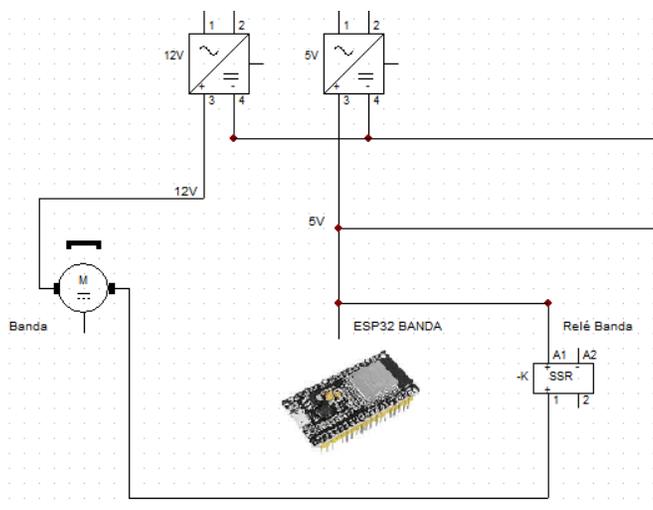
Diagrama unifilar de los robots SCARAs



En la figura 101, se representa la conexión eléctrica de la banda, la cual, solo depende de una fuente 12 voltios para la alimentación, la de activación de la banda consta de una placa ESP32, un controlador de velocidad de 20 amperios y un relé, además, en la banda va estar una cámara web con la que vamos a recibir imágenes en tiempo real para procesar como visión artificial y toma de decisiones.

Figura 101

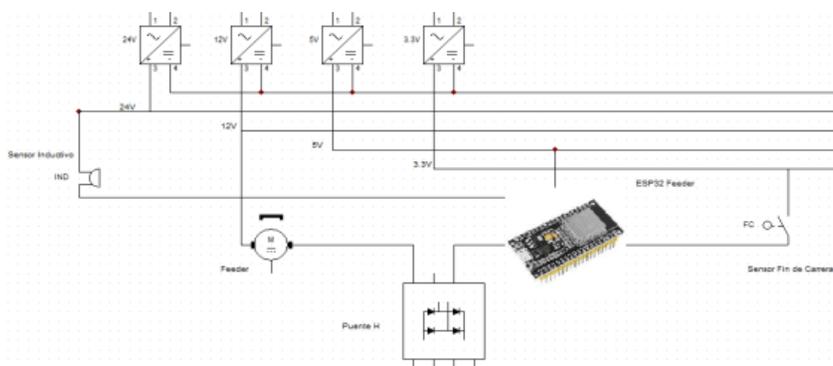
Esquema de la banda transportadora



El sistema de dispensador de piezas está representado por la figura 102 el cual, necesita una alimentación de 12 y 24 voltios para sus elementos, un sensor inductivo y un fin de carrera para el reconocimiento de piezas en el proceso, dos circuitos de acondicionamientos de señales de 3.3 voltios para que la tarjeta ESP32 pueda adquirir los datos y también costa de un controlador de motores L298N para activar el motor.

Figura 102

Diagrama unifilar del sistema dispensador

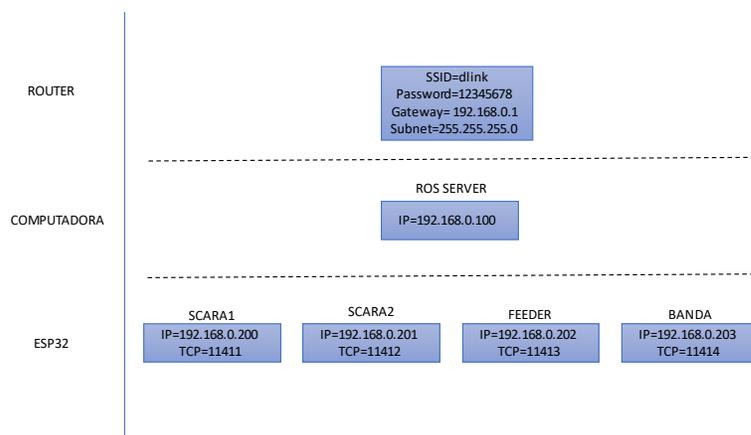


Conexión TCP-IP

Se realizó una red local, para comunicar cada uno de los subsistemas, en la figura 103 se puede ver las configuraciones de cada uno de los elementos para poder recibir y enviar información entre ellos.

Figura 103

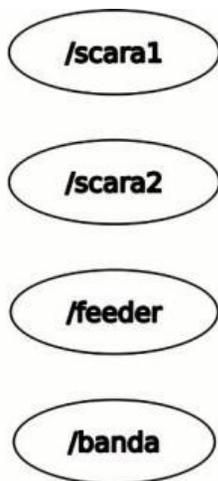
Esquema de configuraciones de red



En la Figura 104 se detalla los nodos que se inicializan una vez conectados los elementos de la celda a la red creada.

Figura 104

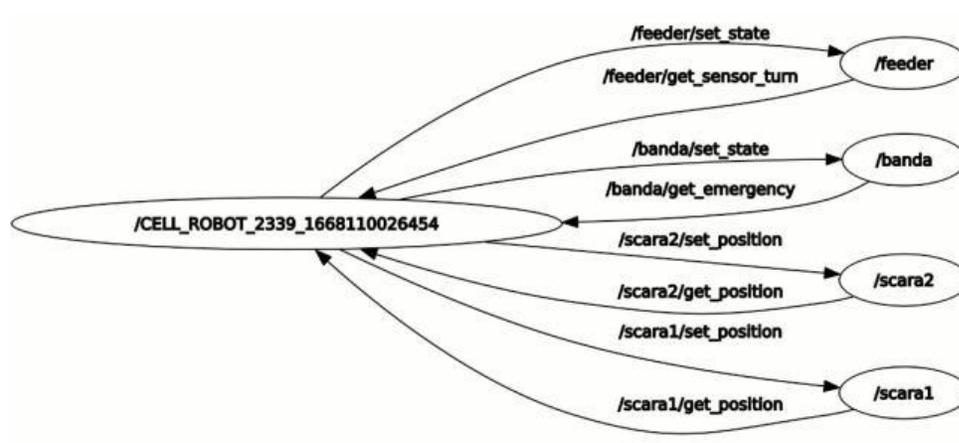
Esquema de nodos creados una vez conectado el TCP en las ESP32 y el Servidor de ROS.



La Figura 105, muestra el esquema de los nodos que se crea una vez activada la HMI donde comparte y recibe datos.

Figura 105

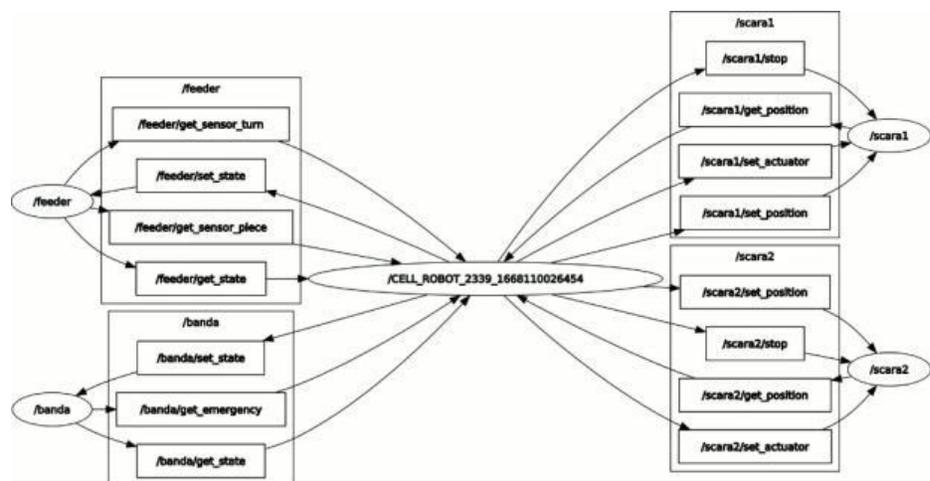
Esquema de nodos para el proceso



La Figura 106 muestra los nodos y tópicos activos en el proceso de clasificación de celda.

Figura 106

Esquema de nodos para el proceso



Capítulo IV

Identificación y Resultados

El cuarto capítulo, presenta la caracterización de plantas de posición y velocidad que son requeridas para entender el comportamiento de la celda inteligente, además se va a realizar el análisis estadístico de las diferentes pruebas a las que sean sometidas los elementos.

Pruebas de Funcionamiento

El presente trabajo involucra la utilización de dos robots SCARA colaborativos con una mesa giratoria para la distribución de piezas metálicas a manipular por los autómatas. Los autómatas al ser repotenciados, presentan mejoras con respecto a su estado inicial previo a realizar cambios para mejorar su comportamiento. Para evidenciar las mejoras en el comportamiento de los robots SCARA, se procede a asignar valores de ángulos a los grados de libertad para determinar el error que existe entre la posición que se desea alcanzar comparada con la posición que alcanza físicamente los eslabones del robot.

Se plantea realizar asignaciones de valores de ángulo a los grados de libertad de forma individual, tomando como patrón los ángulos de 45°, 90°, 135° y 180° a los grados de libertad Q_1 y Q_2 , y se compara con el valor de voltaje que asigna el circuito resistivo acondicionado al mecanismo del robot que permite determinar el ángulo real que toma cada eslabón. Los valores de voltaje se pueden convertir a valores de ángulo por medio de las ecuaciones presentadas:

$$V = 0.1706 + 0.01337Q_1 \quad (9)$$

$$V = 0.1849 + 0.01193 \cdot 0.75Q_2 \quad (10)$$

Las cuales, despejando las variables de interés para el análisis, toman las siguientes formas:

$$Q_1 = \frac{V - 0.1706}{0.01337} \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{V - 0.1849}{0.008948} \quad (12)$$

Para la recolección de datos se estableció que, para cada valor de ángulo asignado a los grados de libertad, se repitió la medida 3 veces; al haber dos grados de libertad en cuestión, a los cuales se le asigna 4 posibles valores de ángulos, además de repetir cada medición 3 veces, se tiene un total de 24 muestras de medición, las cuales son aleatorizadas para evitar que existiese influencia de la persona al momento de medir los resultados de voltaje que se obtienen. En la siguiente tabla se muestra el orden en el que se recolectaron las mediciones para los diferentes valores de ángulo para los grados de libertad Q_1 y Q_2 .

Tabla 48

Orden que se recolectaron las mediciones para los diferentes valores de ángulo para los grados de libertad Q_1 y Q_2

GDL	Ángulo	GDL	Ángulo	GDL	Ángulo
Q1	180	Q1	90	Q1	135
Q2	45	Q2	180	Q1	45
Q1	45	Q1	180	Q1	90
Q1	135	Q2	90	Q2	180
Q2	135	Q2	45	Q2	90
Q2	180	Q2	135	Q2	45
Q1	45	Q2	90	Q1	180
Q1	90	Q2	135	Q1	135

Gracias al circuito resistivo implementado se obtienen las siguientes lecturas de voltaje en cada caso que se han convertido a valores de ángulo.

Tabla 49

Tabla de recolección de datos para muestreo

GDL	Ángulo teórico	Medición de voltaje	Ángulo medido	Error absoluto	Error porcentual	GDL	Ángulo teórico	Medición de voltaje	Ángulo medido	Error absoluto	Error porcentual
Q1	180	2.500	174.212	5.788	3.216	Q1	90	1.314	85.499	4.501	5.001
Q2	45	0.534	38.977	6.023	13.385	Q2	180	1.815	182.160	2.160	1.200
Q1	45	0.780	45.612	0.612	1.359	Q1	180	2.503	174.445	5.555	3.086
Q1	135	1.879	127.795	7.205	5.337	Q2	90	1.071	99.055	9.055	10.061
Q2	135	1.472	143.858	8.858	6.562	Q2	45	0.668	53.942	8.942	19.871
Q2	180	1.812	181.837	1.837	1.021	Q2	135	1.428	138.957	3.957	2.931
Q1	45	0.852	50.939	5.939	13.197	Q2	90	1.088	100.971	10.971	12.190
Q1	90	1.314	85.499	4.501	5.001	Q2	135	1.511	148.247	13.247	9.813

Tabla 50

Tabla de recolección de datos para muestreo

GDL	Ángulo teórico	Medición de voltaje	Ángulo medido	Error absoluto	Error porcentual	GDL	Ángulo teórico	Medición de voltaje	Ángulo medido	Error absoluto	Error porcentual
Q1	180	2.500	174.212	5.788	3.216	Q1	90	1.314	85.499	4.501	5.001
Q2	45	0.534	38.977	6.023	13.385	Q2	180	1.815	182.160	2.160	1.200
Q1	45	0.780	45.612	0.612	1.359	Q1	180	2.503	174.445	5.555	3.086
Q1	135	1.879	127.795	7.205	5.337	Q2	90	1.071	99.055	9.055	10.061
Q2	135	1.472	143.858	8.858	6.562	Q2	45	0.668	53.942	8.942	19.871
Q2	180	1.812	181.837	1.837	1.021	Q2	135	1.428	138.957	3.957	2.931
Q1	45	0.852	50.939	5.939	13.197	Q2	90	1.088	100.971	10.971	12.190
Q1	90	1.314	85.499	4.501	5.001	Q2	135	1.511	148.247	13.247	9.813

Tabla 51*Tabla de recolección de datos para muestreo*

GDL	Ángulo teórico	Medición de voltaje	Ángulo medido	Error absoluto	Error porcentual
Q1	135	2.065	141.727	6.727	4.983
Q1	45	0.858	51.422	6.422	14.270
Q1	90	1.339	87.384	2.616	2.907
Q2	180	1.935	195.639	15.639	8.688
Q2	90	1.060	97.819	7.819	8.688
Q2	45	0.655	52.589	7.589	16.865
Q1	180	2.495	173.816	6.184	3.435
Q1	135	2.046	140.306	5.306	3.930

Ingresando los valores de ángulo al software de procesamiento estadístico de datos Minitab, se puede obtener los valores descriptivos que presentan los errores absolutos obtenidos para los dos grados de libertad Q_1 y Q_2 :

Tabla 52

Valores descriptivos que presentan errores absolutos obtenidos para los dos grados de libertad Q_1 y Q_2

Variable	Media	Error estándar de la media	Desv.Est	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Rango
Error	6.561	0.711	481	12.119	0.612	4.501	6.104	8.599	15.639	5.027

De forma gráfica se puede visualizar el histograma de los valores de error absoluto obtenidos de la medición.

Figura 107

Histograma de los valores del error absoluto del ángulo Q_1

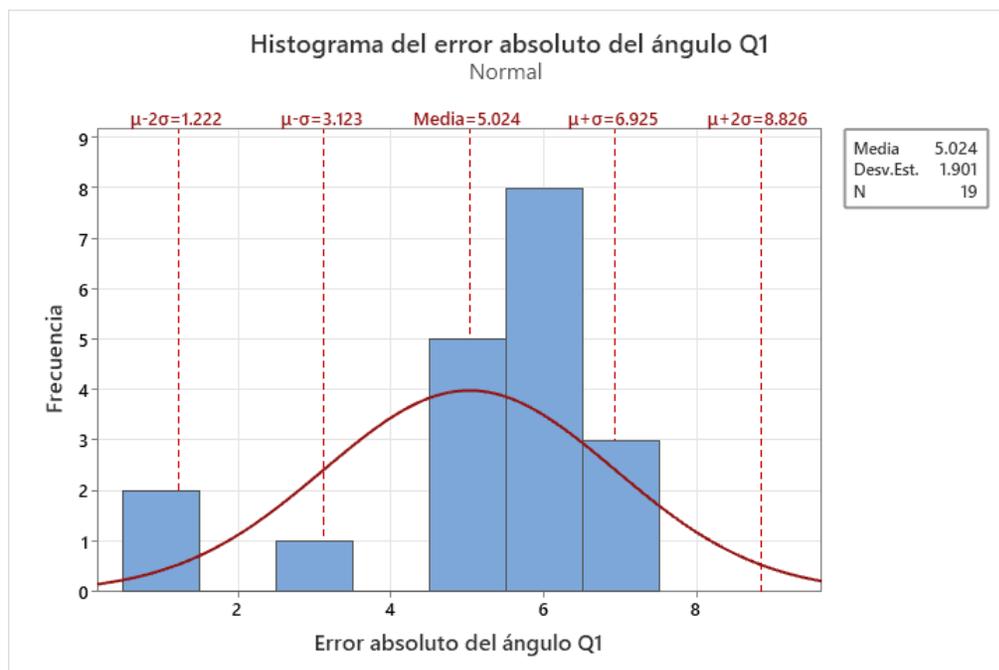
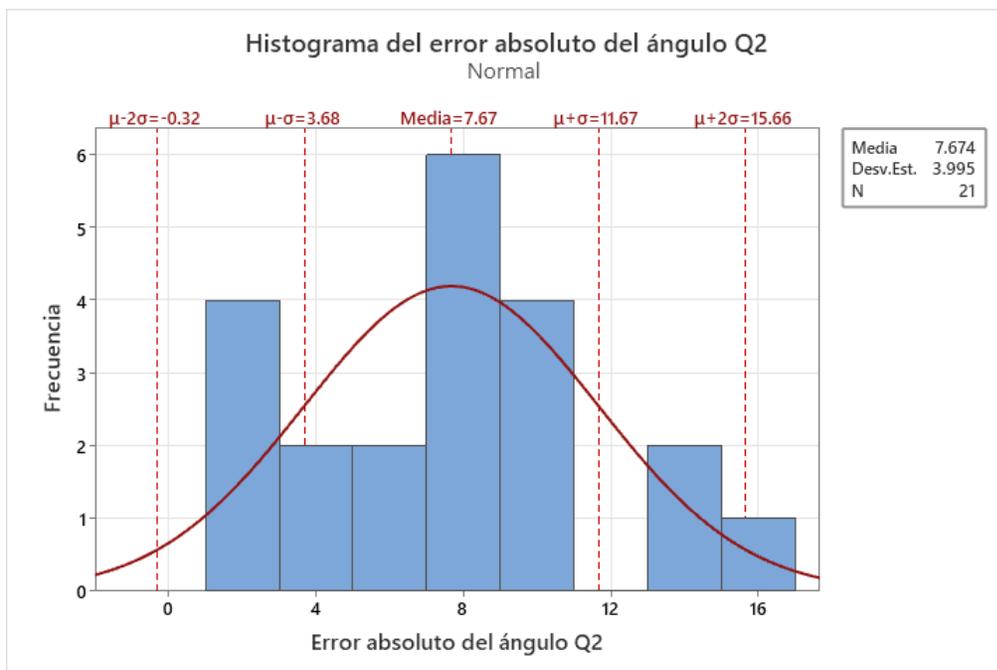


Figura 108

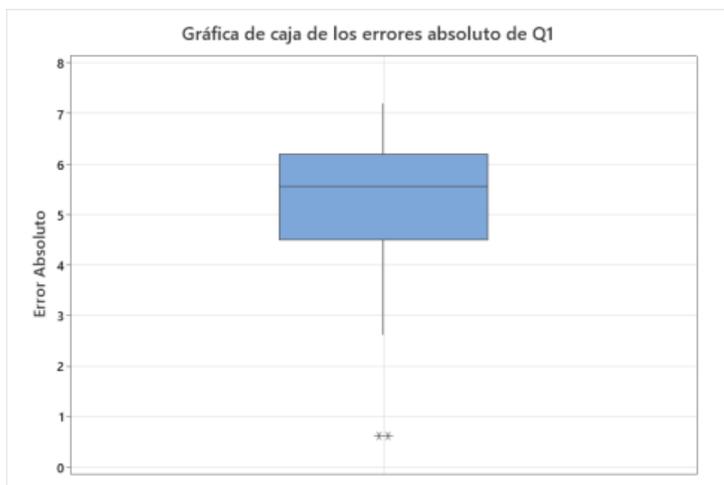
Histograma de los valores del error absoluto del ángulo Q2



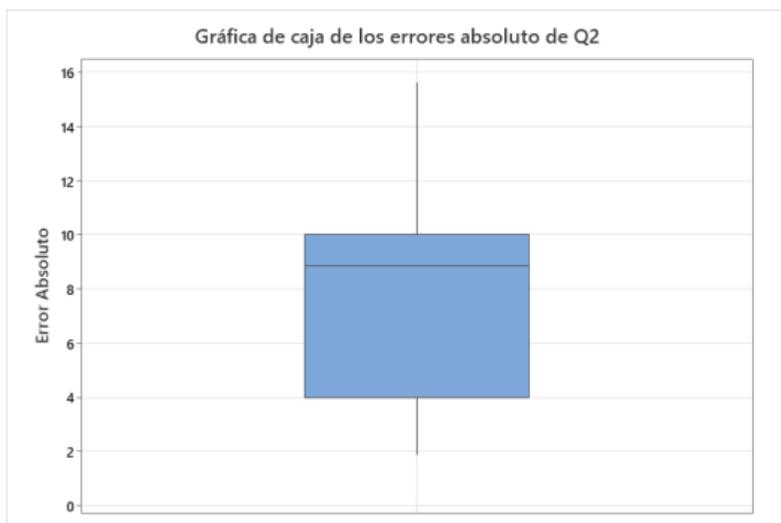
En la Figura 107 y Figura 108 se aprecia que los datos siguen una distribución normal de los valores de Q_1 y Q_2 , donde la media del error absoluto es de $\bar{x}_1 = 5.02^\circ$ y $\bar{x}_2 = 7.67^\circ$ respectivamente con una desviación estándar de $\sigma_1 = 1.901^\circ$ y $\sigma_2 = 3.995^\circ$.

Figura 109

Gráfica de caja de error absoluto del ángulo Q1

**Figura 110**

Gráfica de caja de error absoluto del ángulo Q2



La Figura 109, que corresponde al movimiento que realiza el ángulo Q_1 permite visualizar que existen valores atípicos que afectan a los resultados. Mientras que en la Figura 110 que corresponde movimiento que realiza el ángulo Q_2 se muestra que los valores son normales, los cuales no afectan a las medidas descriptivas. Además, Se calcularon los

coeficientes de dispersión de Pearson de valor $r_1 = 0.27$ y $r_2 = 0.33$, lo que indica que los datos son homogéneos en relación a la media que se ven reflejados en la Figura 111 y Figura 112.

Figura 111

Gráfica de dispersión del Error porcentual vs. Ángulo teórico Q1

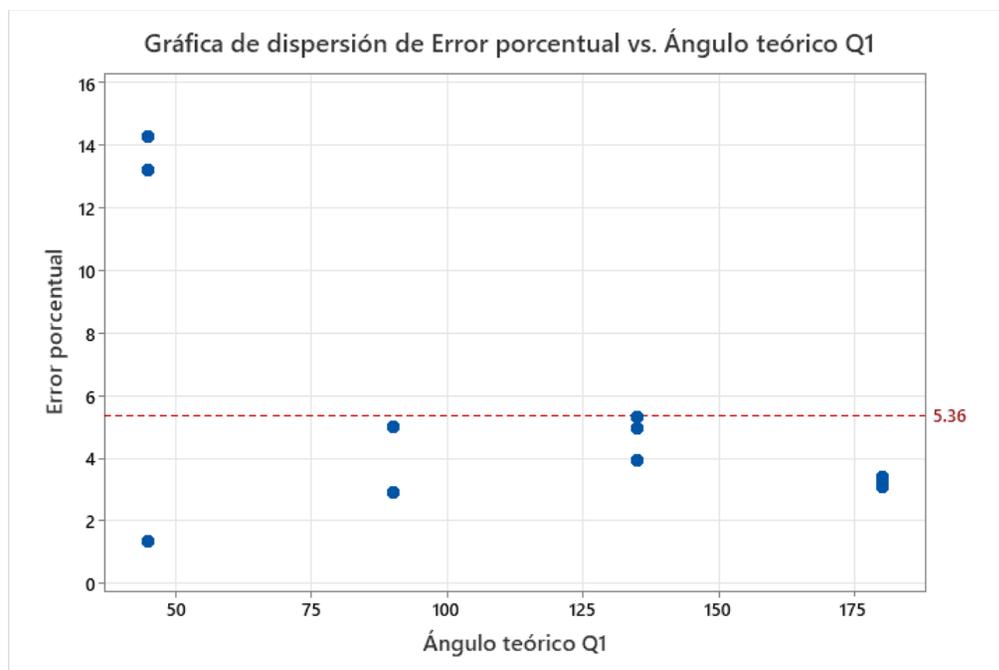
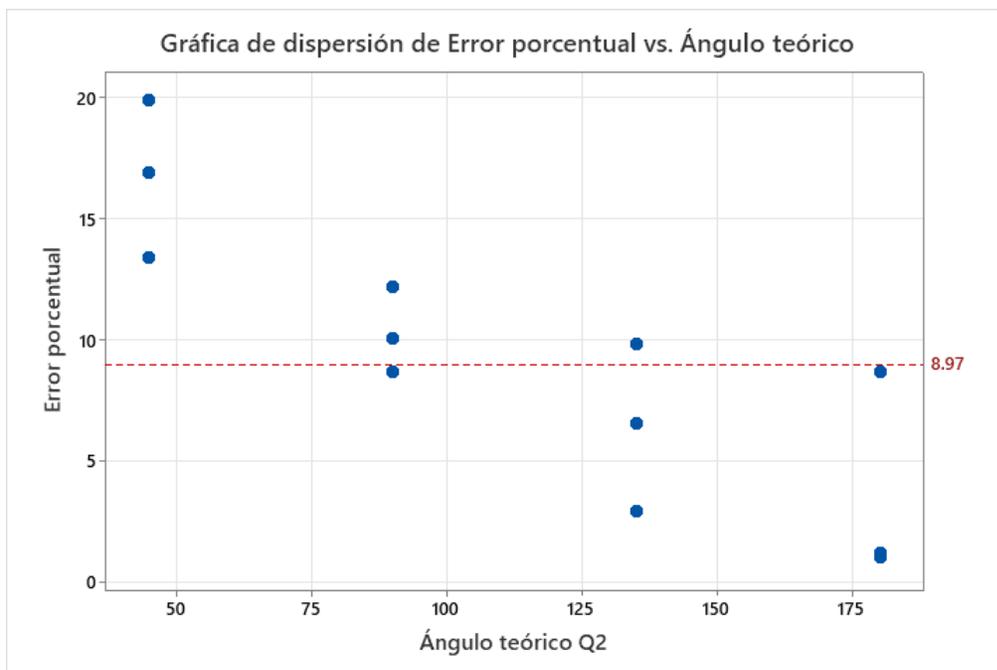


Figura 112

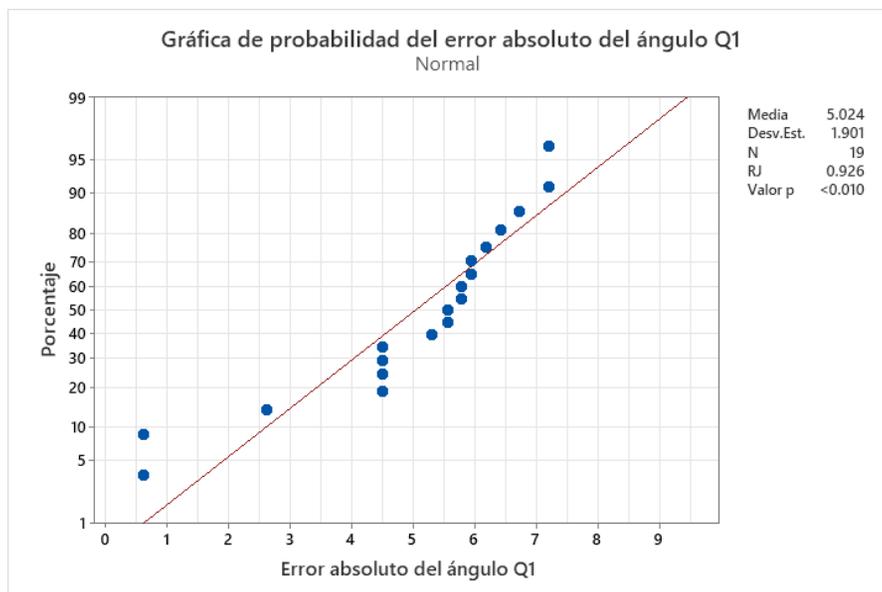
Gráfica de dispersión del Error porcentual vs. Ángulo teórico Q2



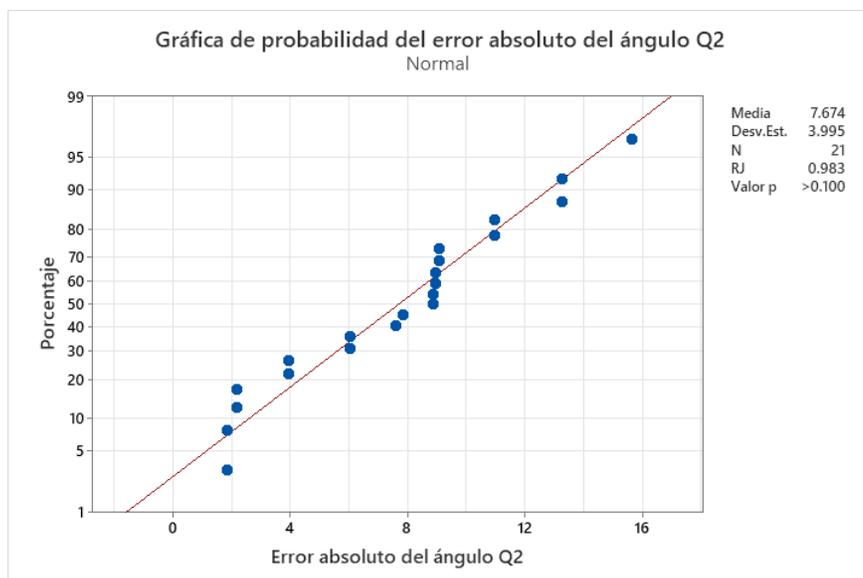
Para verificar la normalidad de los datos, se realiza la prueba de normalidad por el método de Ryan-Joiner. En las Figura 113 y Figura 114 se los resultados obtenidos del error absoluto de Q_1 y Q_2 , donde se aprecia el factor RJ, que es un índice de correlación, por lo que se puede concluir que los valores tomados siguen una distribución normal debido el coeficiente se acercan al valor de 1.

Figura 113

Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner del error absoluto del ángulo Q1

**Figura 114**

Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner del error absoluto del ángulo Q2



Una vez, realizada las correcciones y verificaciones de los datos obtenido, se utilizó un nuevo muestreo estadístico para la obtención de la precisión de los movimientos generados por los grados Q_1 y Q_2 .

En la figura 115 y 116, se puede ver observa que, los valores estadísticos del error absoluto de Q_1 son: media de $\bar{x}_1 = 5.02^\circ$ y desviación estándar de $\sigma_1 = 1.901^\circ$, mientras que para Q_2 son: media de $\bar{x}_2 = 7.67^\circ$ y desviación estándar de $\sigma_2 = 3.995^\circ$, donde se puede concluir que; la precisión de Q_1 oscila entre 95% y el 97.5% mientras que para Q_2 la precisión del brazo del robot se acerca a 91%.

Figura 115

Histograma de la precisión del ángulo Q1.

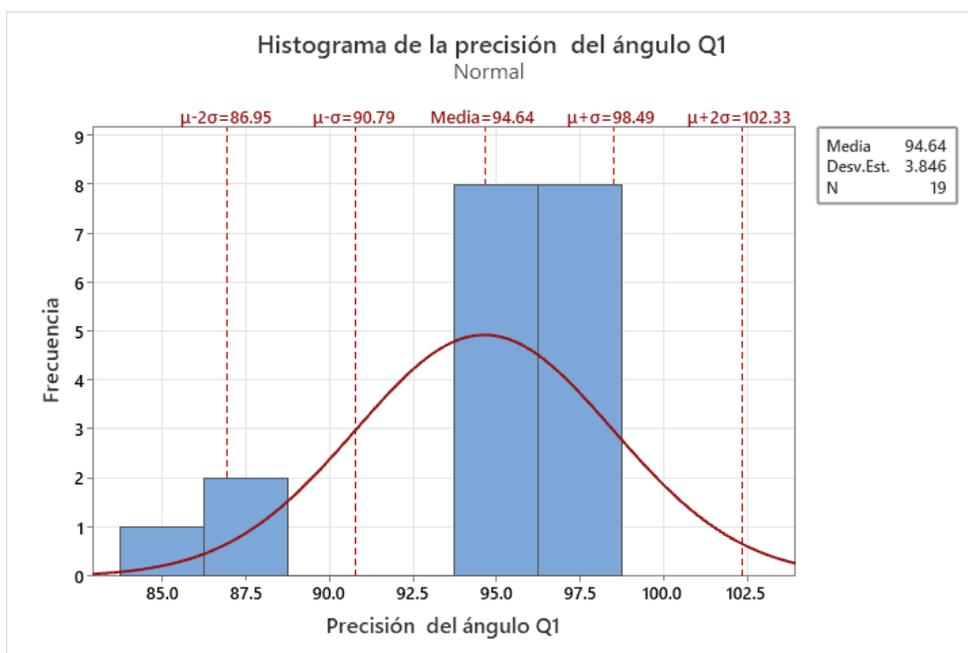
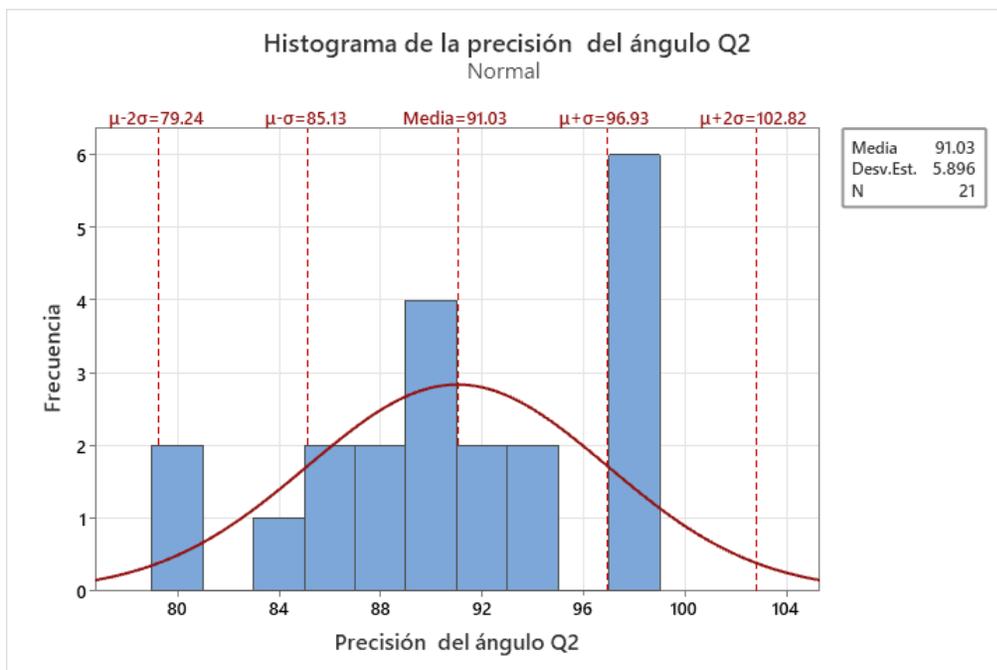


Figura 116

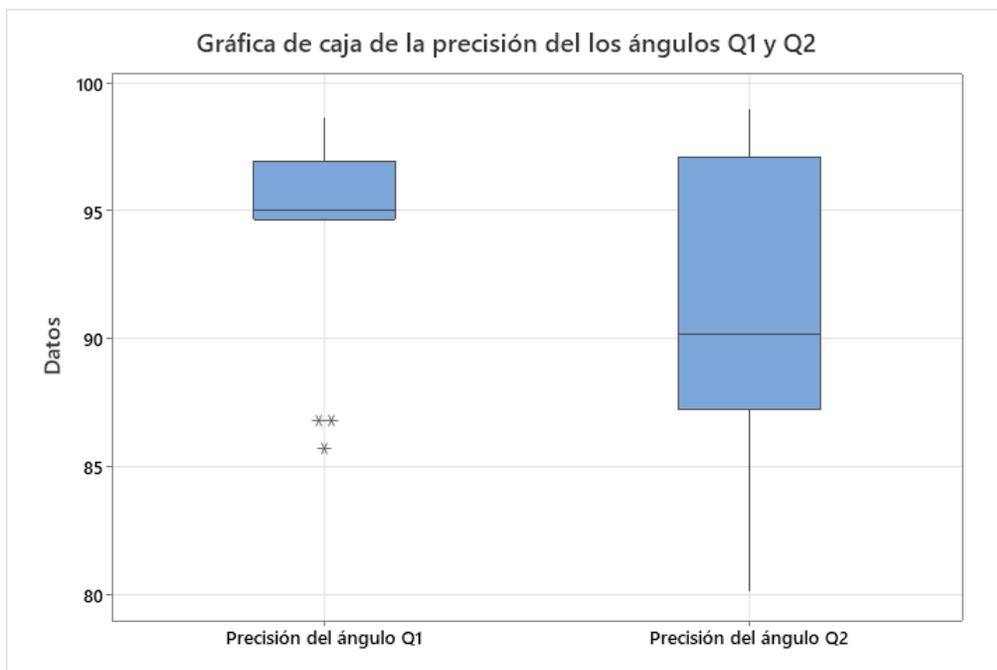
Histograma de la precisión del ángulo Q2



Una vez, obtenido los histogramas se realizó la Figura 117, la cual reflejó los gráficos de caja, con los que se pudo concluir que; para los valores de Q_1 se obtuvo valores atípicos producidos por errores de medición, los cuales pueden ser descartados. Mientras que, los valores de Q_2 tuvieron una dispersión constante.

Figura 117

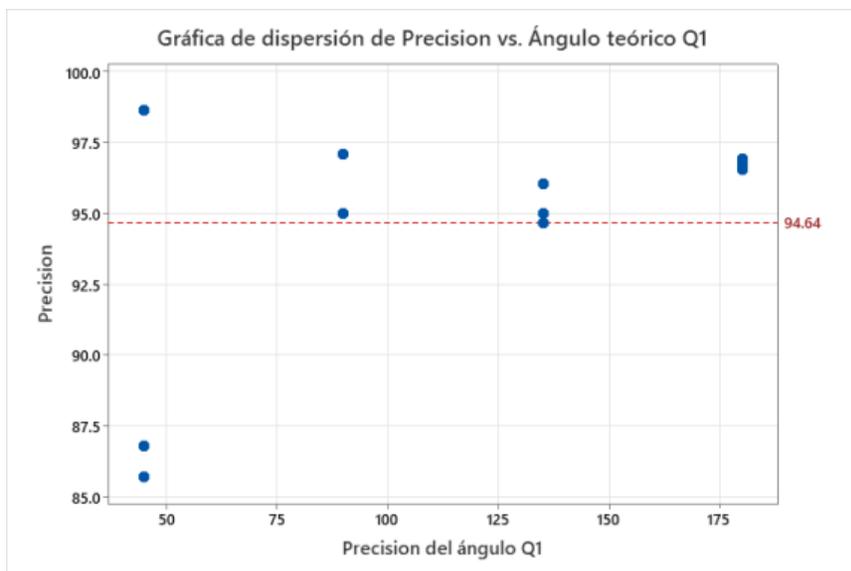
Gráfica de caja precisión de los ángulos Q1 y Q2



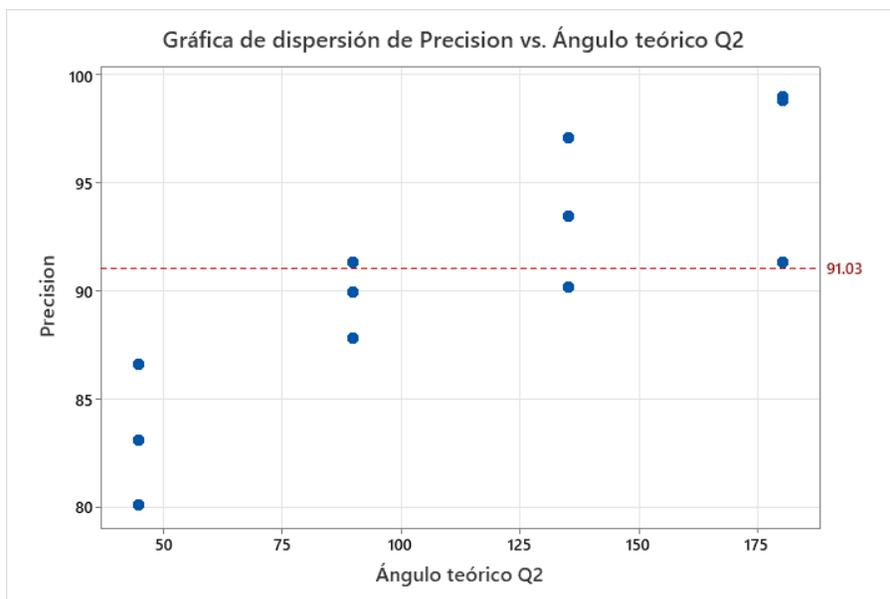
Se realizó la Figura 118 y Figura 119, para visualizar la dispersión de los valores de precisión con respecto a la media aritmética de Q_1 y Q_2 . Los cuales arrojaron los coeficientes de dispersión de Pearson de $r_1 = 0.04$ y $r_2 = 0.06$ respectivamente, lo que significa los valores de precisión son homogéneos.

Figura 118

Gráfica de dispersión de Precisión vs. Ángulo Q1

**Figura 119**

Gráfica de dispersión de Precisión vs. Ángulo Q2



Se repitió el proceso para la verificación de la normalidad de los datos, con la prueba de normalidad por el método de Ryan-Joiner.

En la Figura 120 y Figura 121 se muestra las gráficas de la normalidad de la precisión de Q_1 y Q_2 , donde los factores de RJ son $RJ_1 = 0.868$ y $RJ_2 = 0.982$ los que indican que los valores tomados siguen una distribución normal debido a que se acercan al valor de 1.

Figura 120

Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner de la precisión del ángulo Q1

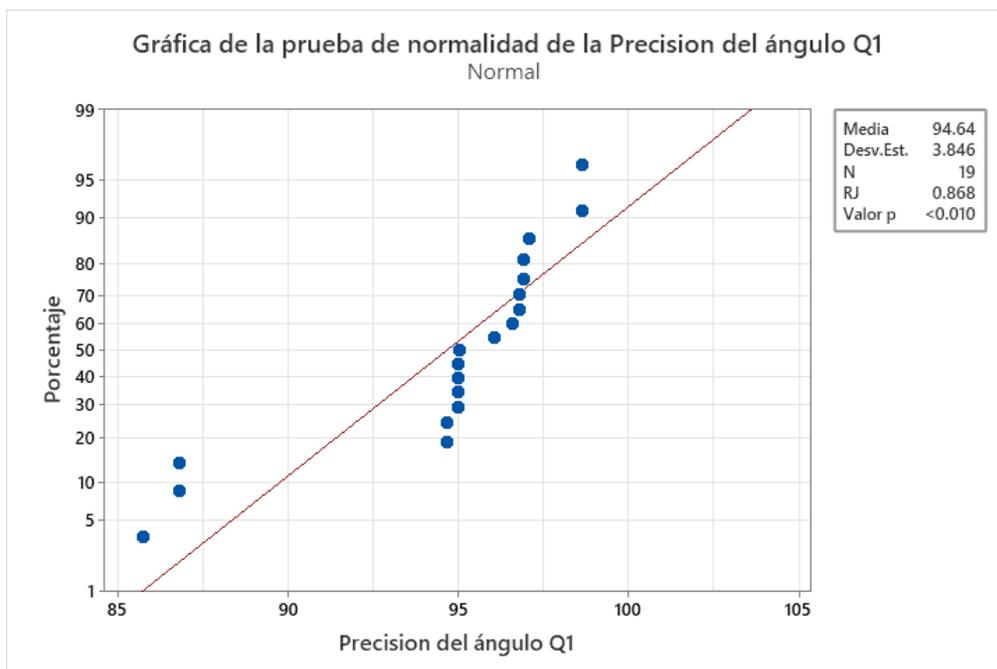
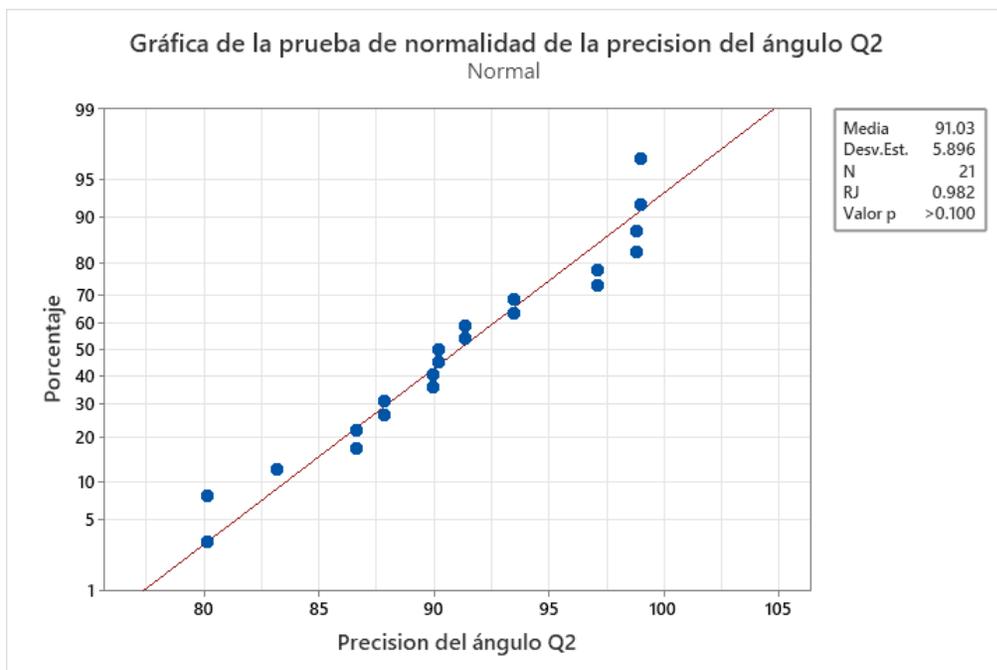


Figura 121

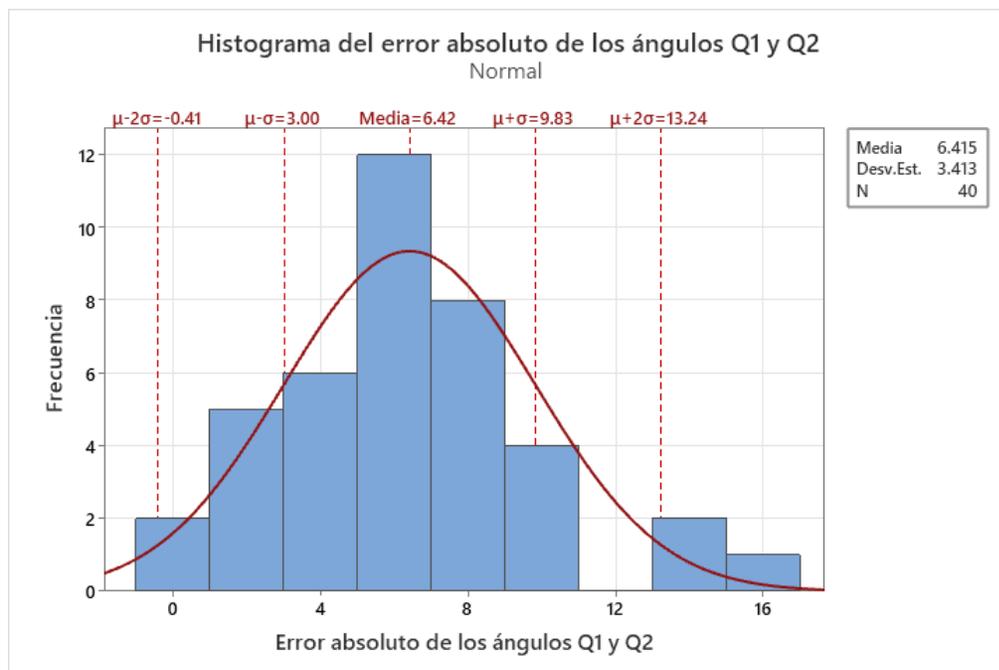
Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner de la precisión del ángulo Q2



Una vez, que se realizó la toma de datos individuales de cada grado de libertad, se hizo un muestreo combinación individual de los motores; es decir, se movió cada uno de los motores secuencialmente tomando en cuenta la Tabla 49, Tabla 50 y Tabla 51, para poder visualizar el comportamiento de cada motor.

Figura 122

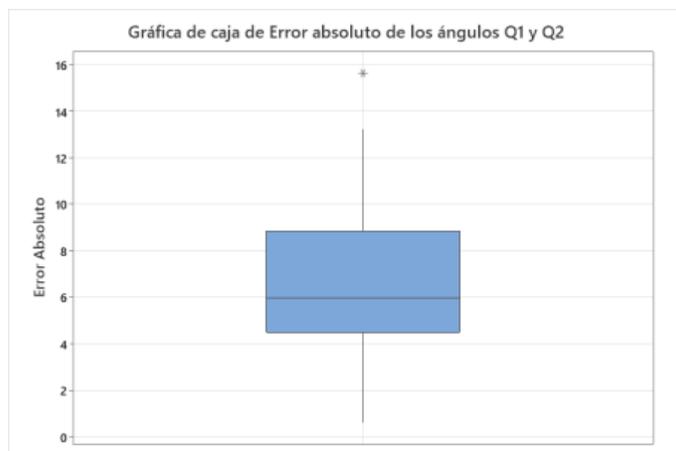
Histograma de los valores del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2



En la Figura 123 se observó que, la curva de ajuste forma de campana de Gauss con respecto al histograma, el cual presenta la posibilidad de que al posicionar uno de los eslabones del robot SCARA, se cometa un error promedio aproximado de $\bar{x} = 6^\circ$. Se le adiciona que la desviación estándar es de $\sigma = 3.413^\circ$, por lo que, al realizar un giro de alguno de los eslabones, se puede decir que existe un 17.5% de probabilidad que se cometa un error entre -0.41° y 3° , un 42.3% que el error de posición sea superior a 3° e inferior a 6.42° , 28.6% que sea inferior a 9.83° y superior a 6.42° , 9.1% que sea superior a 9.83° y 2.5% que sea inferior a 16° .

Figura 123

Gráfica de caja del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2

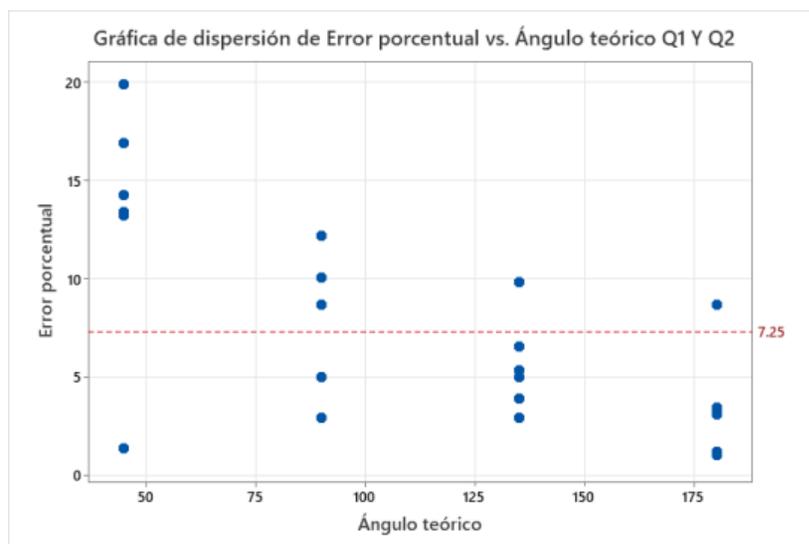


Nota. Realizada en Minitab.

De la Figura 124, se pudo concluir que; para los valores de Q_1 se obtuvo valores atípicos producidos por errores de medición, los cuales pueden ser descartados.

Figura 124

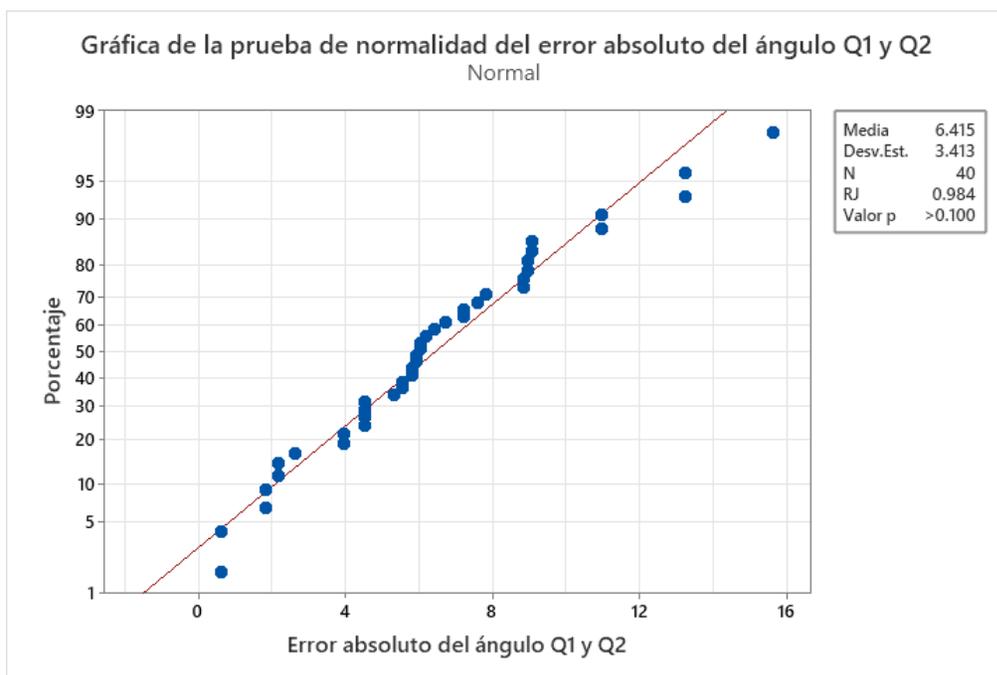
Histograma de los valores del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2



En base a la Figura 125, se puede determinar, que la zona que se comete errores considerablemente mayores al valor medio es al rotar 45°, puesto que hay una dispersión elevada para el ángulo, yendo desde 2.5% a 20% aproximadamente de error. El valor de rotación más confiable es cuando el ángulo es de 180°, puesto que se presenta mínima dispersión con respecto al error, y existe la probabilidad que se cometa un error bajo, aproximadamente de 7%, por lo que, en esta zona, el error puede ir desde los 2% al 9% de error.

Figura 125

Gráfica de prueba de normalidad Ryan-Joiner del error absoluto la secuencia de los ángulos Q1 y Q2



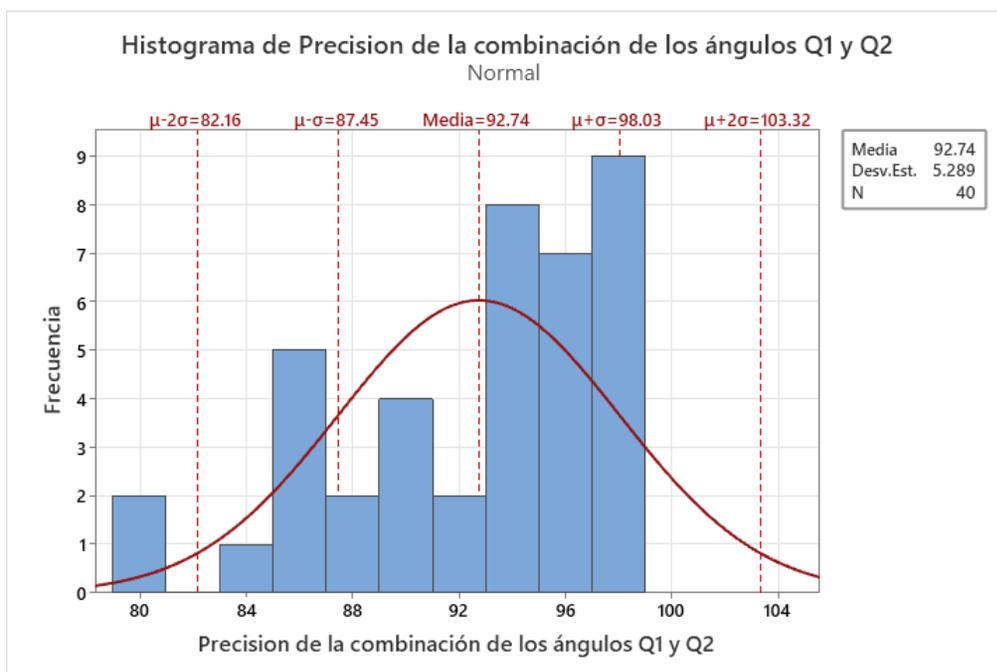
Para verificar la normalidad de los datos de la Figura 126, se realiza la prueba de normalidad por el método de Ryan-Joiner, el cual arroja la gráfica de la normalidad del error, donde se aprecia el factor RJ, que es un índice de correlación, que, para el caso, se acerca al

valor de 1, por lo que se puede aceptar que los valores tomados siguen una distribución normal.

Después, de realizada las correcciones y verificaciones de los datos obtenido, se utilizó un nuevo muestreo estadístico para la obtención de la precisión de los movimientos generados por los grados Q_1 y Q_2 usando la secuencia propuesta.

Figura 126

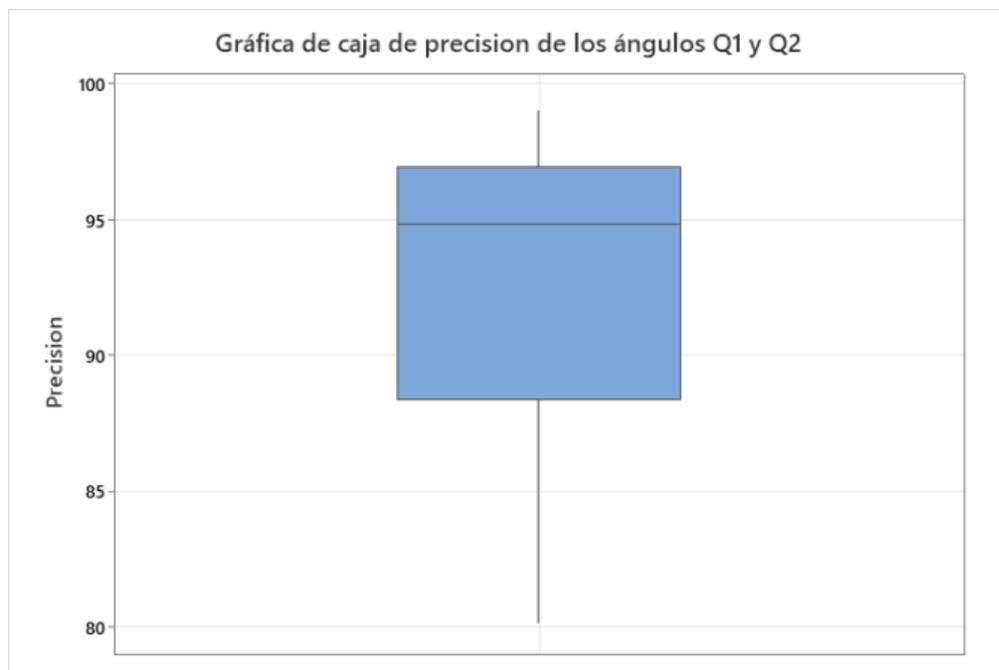
Histograma de los valores de precisión la secuencia de los ángulos Q_1 y Q_2



De la Figura 127, la gráfica del histograma se puede apreciar que los datos siguen una distribución normal, donde la media del error absoluto para secuencia es $\bar{x} = 4.38^\circ$ con una desviación estándar de $\sigma = 3.63^\circ$.

Figura 127

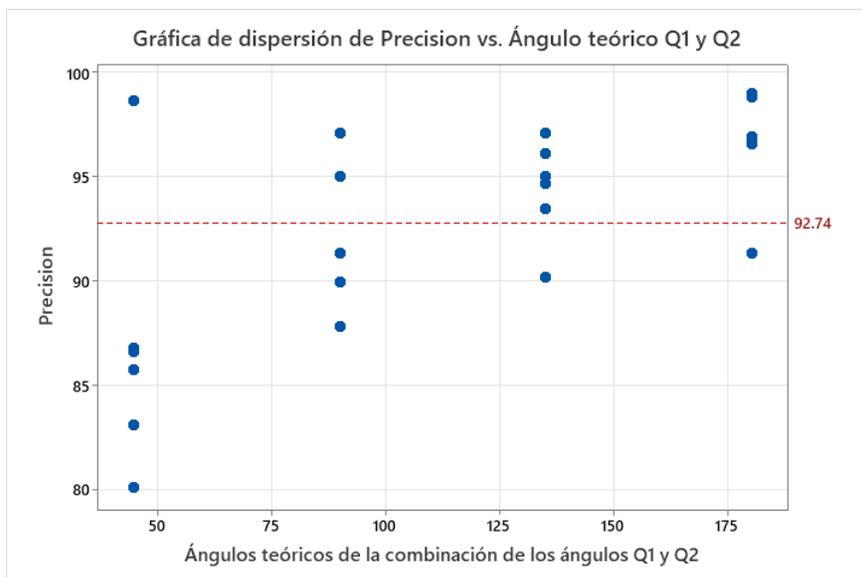
Gráfica de caja de la precisión de la secuencia de los ángulos Q1 y Q2



Se realizó la Figura 128 para visualizar la dispersión de los valores de precisión con respecto a la media aritmética de la secuencia de Q_1 y Q_2 . El cual arrojó el coeficiente de dispersión de Pearson de $r = 0.057$ lo que significa los valores de precisión son homogéneos.

Figura 128

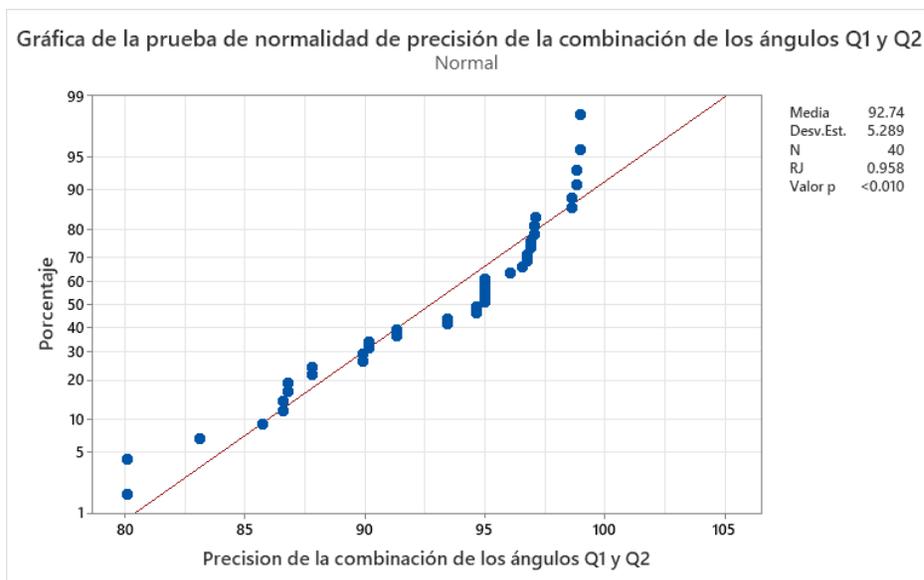
Gráfica de dispersión de Precisión vs. Ángulo teórico de la secuencia de los ángulos Q1 y Q2



Para verificar la normalidad de los datos de la Figura 129, se realiza la prueba de normalidad por el método de Ryan-Joiner, el cual arroja la gráfica de la normalidad del error, donde se aprecia el factor RJ, que es un índice de correlación, que, para el caso, se acerca al valor de 1, por lo que se puede aceptar que los valores tomados siguen una distribución normal.

Figura 129

Gráfica de la prueba de normalidad de la precisión de la secuencia de los ángulos Q1 y Q2



Adicionalmente, se hicieron mediciones de ángulos de los grados de libertad Q_1 y Q_2 de forma conjunta, es decir, ambos motores girando a la vez. Se realiza mediante una la Tabla 53 combinatorial donde Q_1 y Q_2 toman valores de ángulos 0° , 45° , 90° , 135° y 180° . De las siguientes combinaciones se obtiene la siguiente tabla de valores.

Tabla 53*Tabla de recolección de datos para muestreo*

Q1	Q2	Medición de voltaje 1	Medición de voltaje 2	Ángulo Medido 1	Ángulo Medido 2	Error Absoluto 1	Error Absoluto 2	Error Porcentual 1	Error Porcentual 2	Precisión
180	180	1.82473	2.56006	183.2728	178.7180	3.2728	1.28202	1.8182	0.7122	98.73
135	90	1.50806	1.46762	147.8802	97.0098	12.8802	7.00977	9.5409	7.7886	91.33
90	45	1.10247	0.88899	102.5501	53.7312	12.5501	8.73121	13.9446	19.4027	83.32
180	180	1.86235	2.58192	187.4765	180.3528	7.4765	0.35278	4.1536	0.1960	97.82
90	90	1.04792	1.45760	96.4535	96.2602	6.4535	6.26025	7.1705	6.9558	92.93
180	135	1.86123	1.98909	187.3518	136.0127	7.3518	1.01269	4.0843	0.7501	97.58
180	90	1.86317	1.50462	187.5681	99.7771	7.5681	9.77712	4.2045	10.8635	92.46
90	45	1.07155	0.87546	99.0948	52.7195	9.0948	7.71953	10.1054	17.1545	86.37
135	45	1.41755	0.88024	137.7646	53.0774	2.7646	8.07738	2.0479	17.9497	90.00
45	135	0.69114	1.99560	56.5795	136.4996	11.5795	1.49958	25.7322	1.1108	86.57

Tabla 54*Tabla de recolección de datos para muestreo*

Q1	Q2	Medición de voltaje 1	Medición de voltaje 2	Ángulo Medido 1	Ángulo Medido 2	Error Absoluto 1	Error Absoluto 2	Error Porcentual 1	Error Porcentual 2	Precisión
45	135	0.69114	1.99560	56.5795	136.4996	11.5795	1.49958	25.7322	1.1108	86.57
90	180	0.90296	2.57952	80.2528	180.1739	9.7472	0.17386	10.8303	0.0966	94.53
135	180	1.36928	2.58660	132.3704	180.7032	2.6296	0.70323	1.9478	0.3907	98.83
90	90	1.11357	1.47659	103.7915	97.6809	13.7915	7.68086	15.3239	8.5343	88.07
90	180	1.11362	2.56541	103.7960	179.1184	13.7960	0.88156	15.3289	0.4898	92.09
45	180	0.68192	2.57391	55.5490	179.7540	10.5490	0.24603	23.4422	0.1367	88.21
135	180	1.40391	2.57815	136.2402	180.0708	1.2402	0.07077	0.9187	0.0393	99.52
180	45	1.79275	0.89392	179.6981	54.1001	0.3019	9.10015	0.1677	20.2226	89.80
45	45	0.69439	0.86130	56.9422	51.6607	11.9422	6.66071	26.5383	14.8016	79.33
45	135	0.69114	1.99560	56.5795	136.4996	11.5795	1.49958	25.7322	1.1108	86.57

Tabla 55*Tabla de recolección de datos para muestreo*

Q1	Q2	Medición de voltaje 1	Medición de voltaje 2	Ángulo Medido 1	Ángulo Medido 2	Error Absoluto 1	Error Absoluto 2	Error Porcentual 1	Error Porcentual 2	Precisión
45	90	0.69117	1.37100	56.5821	89.7832	11.5821	0.21678	25.7379	0.2409	87.01
135	90	1.37573	1.34107	133.0904	87.5444	1.9096	2.45562	1.4145	2.7285	97.92
45	180	0.71375	2.55155	59.1063	178.0818	14.1063	1.91824	31.3472	1.0657	83.79
135	135	1.41934	2.04312	137.9650	140.0541	2.9650	5.05408	2.1963	3.7438	97.03
45	135	0.70596	2.05220	58.2348	140.7328	13.2348	5.73284	29.4106	4.2466	83.17
90	135	0.89828	2.04679	79.7301	140.3281	10.2699	5.32808	11.4110	3.9467	92.32
135	45	1.41027	0.87214	136.9509	52.4710	1.9509	7.47103	1.4451	16.6023	90.97
135	135	1.41075	1.97812	137.0050	135.1925	2.0050	0.19251	1.4852	0.1426	99.18
180	90	1.73777	1.49607	173.5532	99.1379	6.4468	9.13795	3.5816	10.1533	93.13
45	90	0.69117	1.37100	56.5821	89.7832	11.5821	0.21678	25.7379	0.2409	87.01

Tabla 56

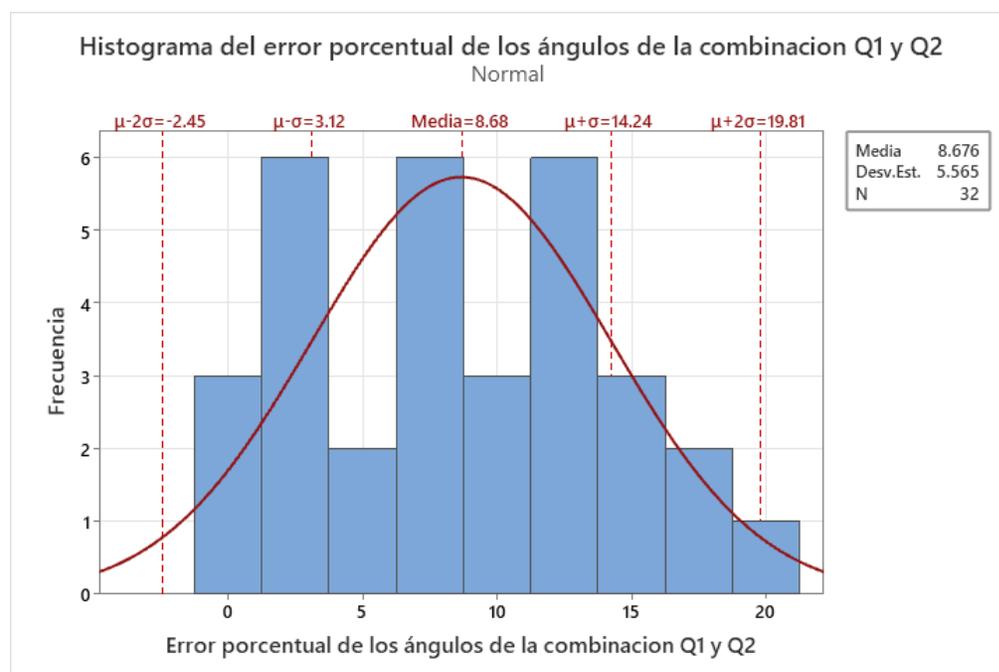
Tabla de recolección de datos para muestreo

Q1	Q2	Medición de voltaje 1	Medición de voltaje 2	Ángulo Medido 1	Ángulo Medido 2	Error Absoluto 1	Error Absoluto 2	Error Porcentual 1	Error Porcentual 2	Precisión
45	90	0.66397	1.49319	53.5428	98.9222	8.5428	8.92218	18.9841	9.9135	85.55
180	135	1.88257	1.97558	189.7367	135.0020	9.7367	0.00198	5.4093	0.0015	97.29
90	135	1.08394	1.98225	100.4799	135.5012	10.4799	0.50120	11.6443	0.3713	93.99
180	45	1.86106	0.89203	187.3325	53.9587	7.3325	8.95868	4.0736	19.9082	88.00
45	45	0.64204	0.86616	51.0917	52.0239	6.0917	7.02388	13.5372	15.6086	85.42

En Figura 130 los histogramas, se puede determinar que durante el movimiento de los eslabones del robot es más factible que se produzca un error cercano a los 8°, o en contraparte, que se cometa un error de posición cercano a 1°; El cual puede ser explicado por el coeficiente de dispersión de Pearson, que arroja un valor de 0.82 lo que indica una dispersión considerable de los errores absolutos con respecto a la media. Esta dispersión no es debida a valores atípicos, puesto que el diagrama de bloques descarta la existencia de estos, por lo que la dispersión puede deberse a errores producidos durante el proceso de medición.

Figura 130

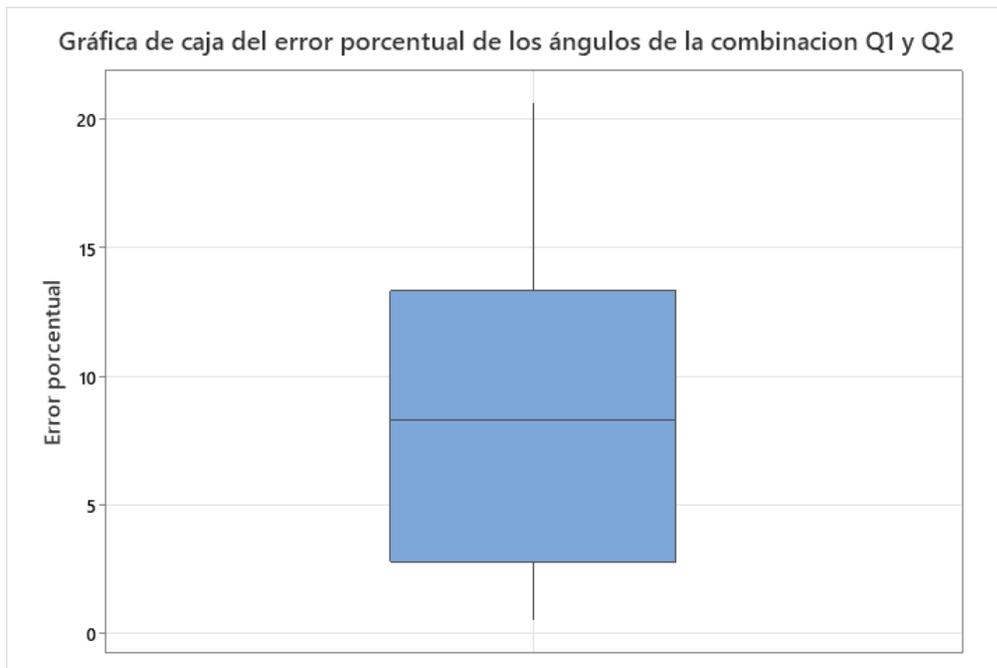
Histograma del error porcentual de los ángulos de la combinación Q1 y Q2



A pesar de la dispersión elevada de los valores de error, que se muestran en la Figura 131 durante el proceso de medición de la posición angular, los datos obtenidos siguen una curva de distribución normal, que se puede reflejar con la prueba de Ryan – Joiner, donde el estadístico de prueba supera el valor de confiabilidad de $\alpha = 0.05$.

Figura 131

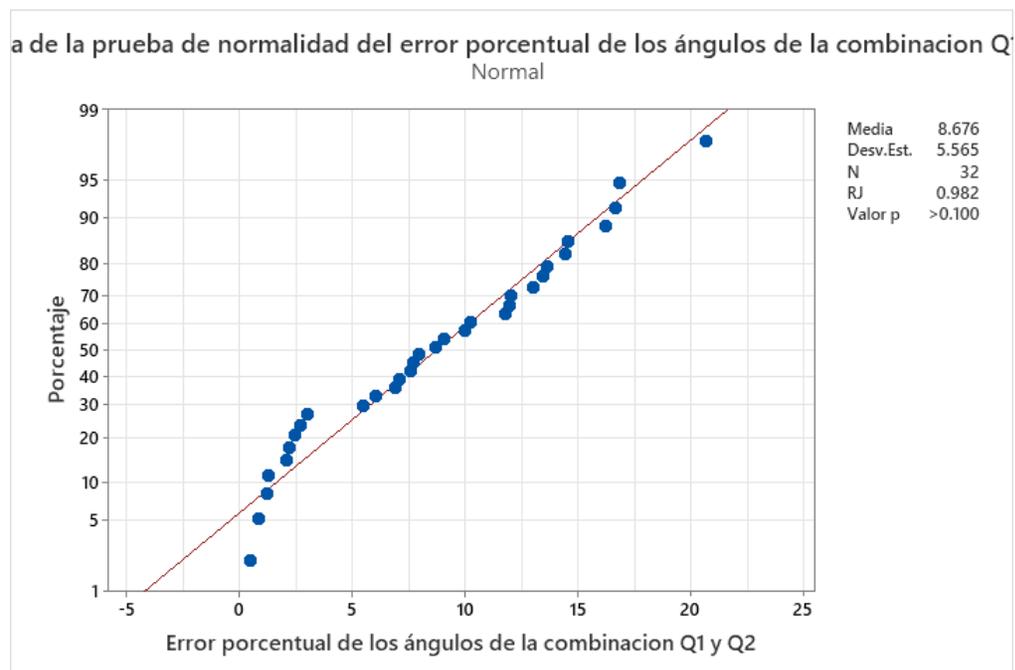
Gráfica de caja del error porcentual de los ángulos de la combinación Q1 y Q2



Para verificar la normalidad de los datos de la Figura 132, se realiza la prueba de normalidad por el método de Ryan-Joiner, el cual arroja la gráfica de la normalidad del error, donde se aprecia el factor RJ, que es un índice de correlación, que, para el caso, se acerca al valor de 1, por lo que se puede aceptar que los valores tomados siguen una distribución normal.

Figura 132

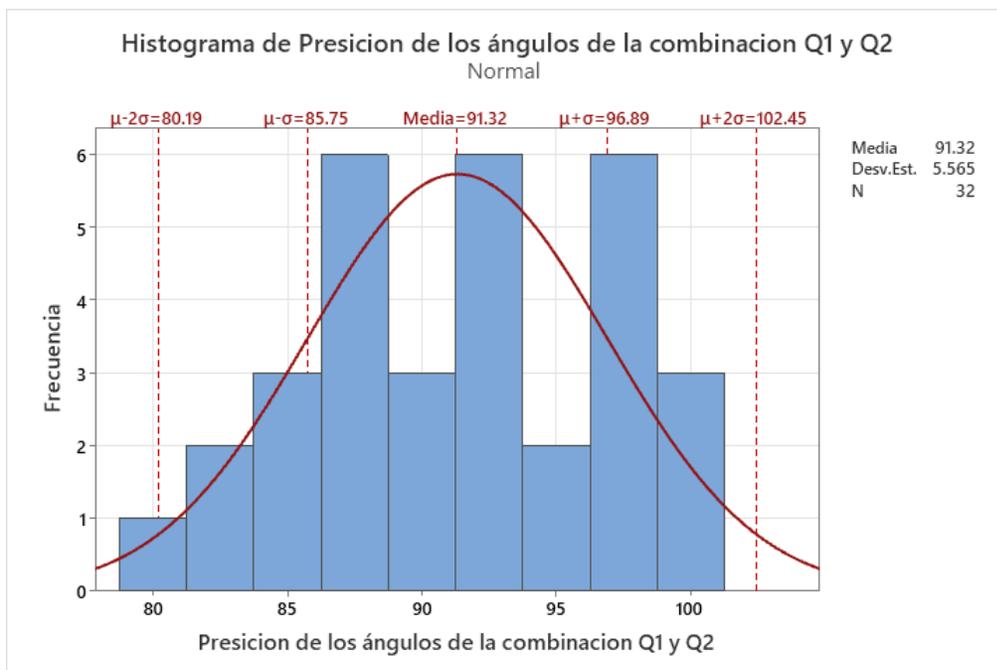
Gráfica de la prueba de normalidad del error porcentual de los ángulos de la combinación Q1 y Q2



Para la precisión, en base a los datos obtenidos de la Figura 133, la gráfica del histograma se puede apreciar, que los datos siguen una distribución normal, donde la media del error absoluto para secuencia es $\bar{x} = 91.32\%$ con una desviación estándar de $\sigma = 5.565\%$.

Figura 133

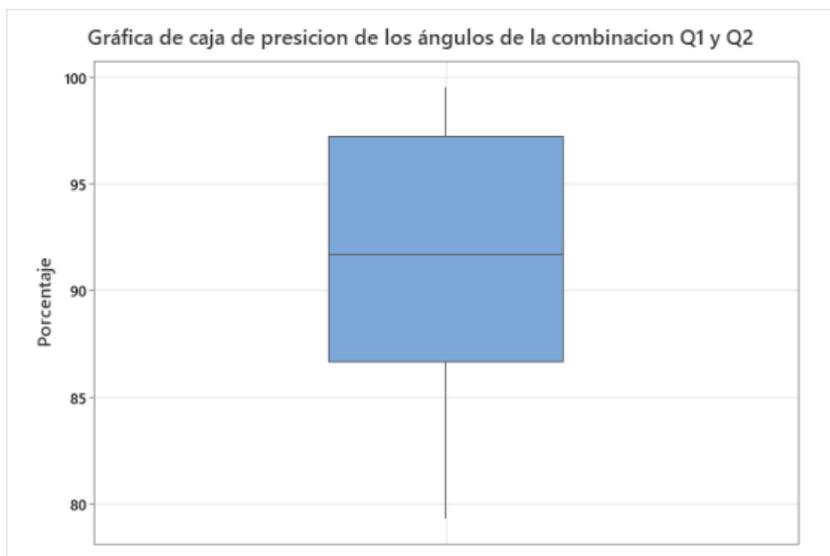
Histograma de la precisión de los ángulos de la combinación Q1 y Q2



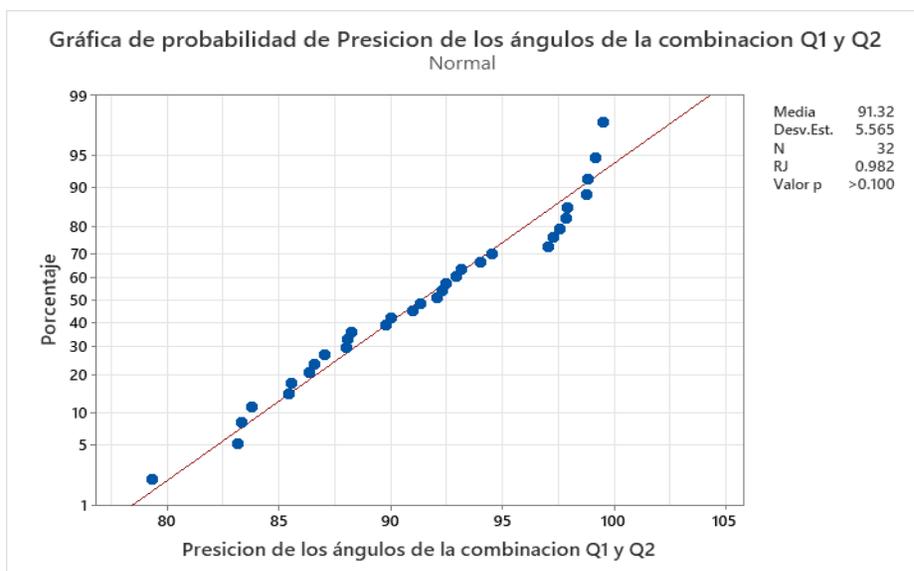
A pesar de la dispersión elevada de los valores de error, que se muestran en la Figura 134 durante el proceso de medición de la posición angular, los datos obtenidos siguen una curva de distribución normal, que se puede reflejar con la prueba de Ryan – Joiner, donde el estadístico de prueba supera el valor de confiabilidad de $\alpha = 0.07$.

Figura 134

Gráfica de caja de la precisión de los ángulos de la combinación Q1 y Q2

**Figura 135**

Gráfica de la prueba de normalidad de la precisión de los ángulos de la combinación Q1 y Q2



Para verificar la normalidad de los datos de la Figura 135 se realiza la prueba de normalidad por el método de Ryan-Joiner, el cual arroja la gráfica de la normalidad del error, donde se aprecia el factor RJ, que es un índice de correlación, que, para el caso, se acerca al

valor de 1, por lo que se puede aceptar que los valores tomados siguen una distribución normal.

Para la detección de piezas rojas o azules, se utilizó el filtro HSV, para luego poder reducir el área de trabajo como se muestran en las figuras 136 y 137.

Figura 136

Reconocimiento de piezas roja y azules en un fondo negro

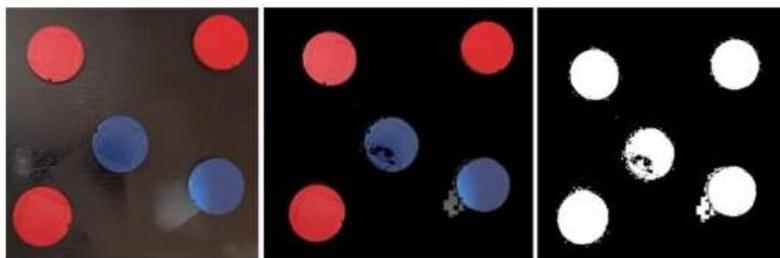
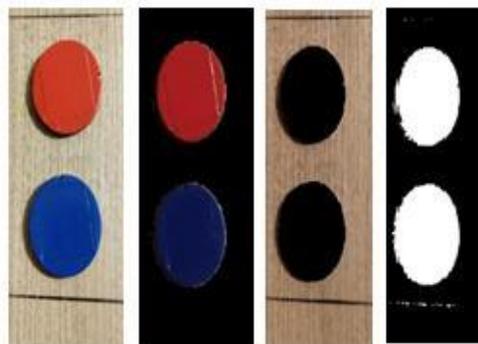


Figura 137

Recorte del área de trabajo en un fondo claro



Después de aplicar el filtro, es necesario usar la matriz de confusión para poder evaluar el desempeño del algoritmo de identificación y decidir si el procedimiento es fiable o no como se muestra en la tabla 56.

Tabla 57

Tabla resumen de la matriz de observación

Matriz de observación									
Clase	Medidas				Resultados %				
	TP	TN	FP	FN	Sensibilidad	Especificidad	Exactitud	Precisión	Precisión Ge
Rojo	70	70	1	2	97.22	98.59	97.90	98.58	95.89
Azul	70	70	2	1	98.59	97.22	97.90	97.22	95.89

En general el modelo del algoritmo usado para la visión artificial tiene un 95.89% de precisión general y una exactitud de 97.90% y una fiabilidad de 97.22% y 98.59%. Por tal motivo se concluye que el modelo a utilizar es apto para el proceso a utilizar.

Una vez realizada la implementación de los componentes de la celda, se procede a realizar las pruebas de clasificación del proceso, el cual consiste en realizar una muestra de 360 piezas, las cuales van a ser clasificadas en lotes de 12 piezas y con las 30 medias de cada lote se saca un muestreo de una media general.

Tabla 58*Tabla de errores de clasificación.*

Lote	Número de piezas	Piezas clasificadas	Error absoluto	Error porcentual	Precisión
1	12	10	2	16.66	83.33
2	12	10	2	16.66	83.33
3	12	9	3	25.00	75.00
4	12	11	1	8.333	91.66
5	12	10	2	16.66	83.33
6	12	12	0	0.00	100.0
7	12	10	2	16.66	83.33
8	12	9	3	25.00	75.00
9	12	10	2	16.66	83.33
10	12	11	1	8.33	91.66
11	12	11	1	8.33	91.66
12	12	10	2	16.66	83.33
13	12	10	2	16.66	83.33
14	12	9	3	25.00	75.00
15	12	9	3	25.00	75.00
16	12	10	2	16.66	83.33
17	12	11	1	8.33	91.66

Lote	Número de piezas	Piezas clasificadas	Error absoluto	Error porcentual	Precisión
18	12	11	1	8.33	91.66
19	12	10	2	16.66	83.33
20	12	11	1	8.33	91.66
21	12	10	2	16.66	83.33
22	12	10	2	16.66	83.33
23	12	10	2	16.66	83.33
24	12	8	4	33.33	66.66
25	12	8	4	33.33	66.66
26	12	10	2	16.66	83.33
27	12	10	2	16.66	83.33
28	12	11	1	8.33	91.66
29	12	12	0	0.00	100.0
30	12	10	2	16.66	83.3

En base a la tabla 57, se realiza el análisis estadístico que se presenta en la tabla 58 y en la figura 138.

Tabla 59

Tabla resumen de la matriz de observación

Variable	Conteo total	Media	Desv. Est.	CoefVar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Rango
Error de clasificación	360	84.17	8	9.5	66.67	83.33	83.33	91.67	100	33.33

Figura 138

Histograma de la precisión de las piezas recogidas

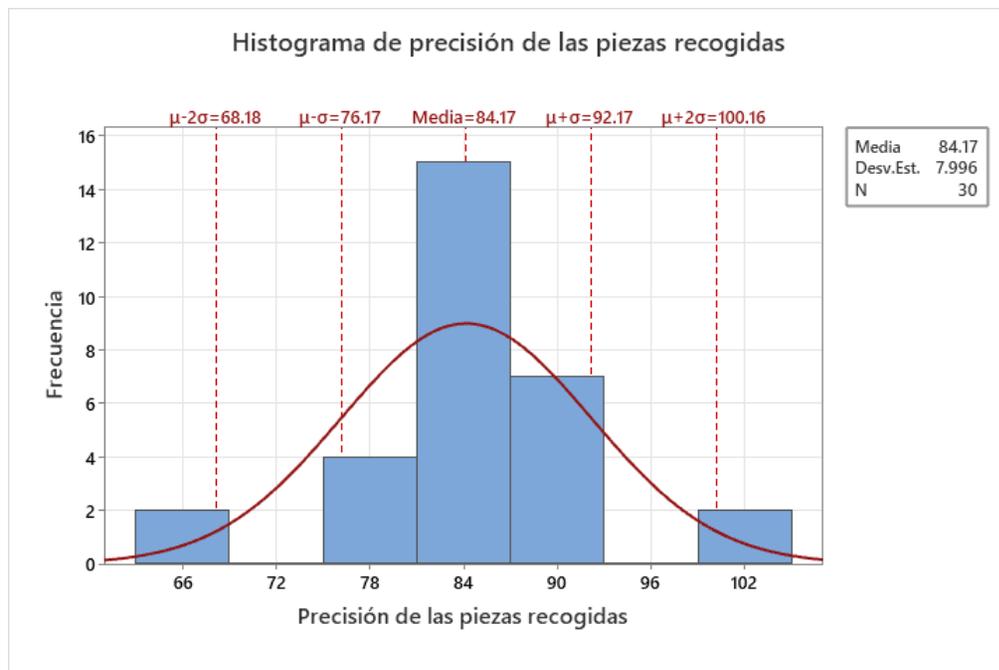
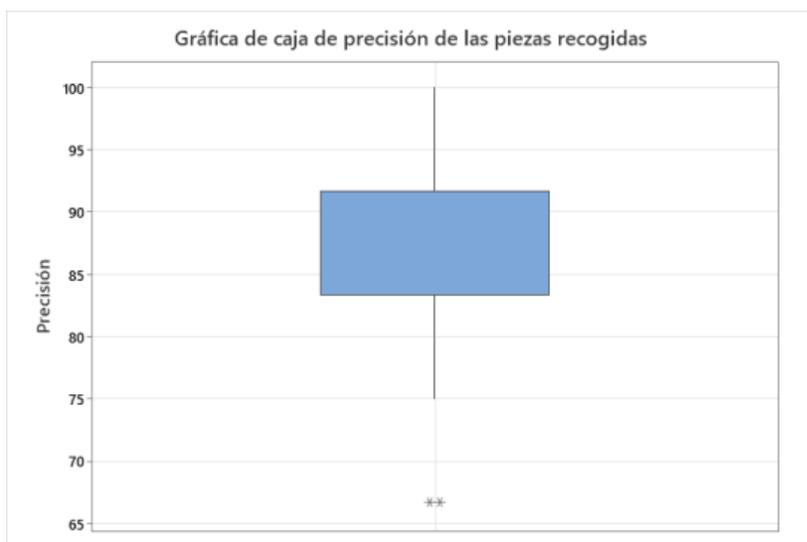
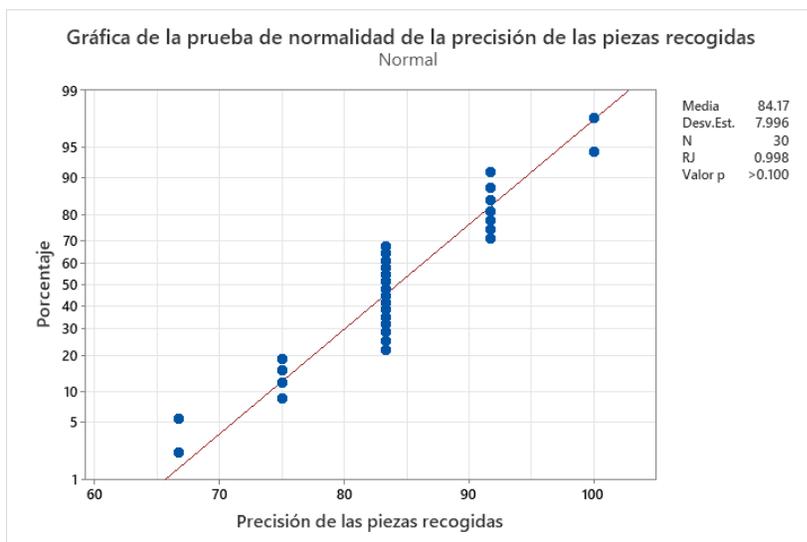


Figura 139

Gráfica de caja de precisión de las piezas recogidas

**Figura 140**

Gráfica de la prueba de normalidad de la precisión de las piezas recogidas



En la Figura 138 se aprecia que los datos siguen una distribución normal de los valores, donde, la media del error absoluto es de $\bar{x} = 84.17^\circ$ respectivamente con una desviación estándar de $\sigma = 7.99^\circ$. Mientras que, en la Figura 139 se pudo concluir que; para los valores de

se obtuvo valores atípicos producidos por errores de medición, los cuales pueden ser descartados y para comprobar que los valores cumplan la normalidad se usa el método de Ryan-Joiner, el cual arroja la gráfica de la normalidad del error, donde se aprecia el factor RJ, que es un índice de correlación, que, para el caso, se acerca al valor de 1, por lo que se puede aceptar que los valores tomados siguen una distribución normal.

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se implementó una celda inteligente de trabajo colaborativo; para clasificación de productos mediante la repotenciación dos robots SCARAs, sistema de transporte e implementación de un sistema de dispensación de material, el cual usa un sistema de visión artificial realiza la detección y reconocimiento de objetos.

Se evaluó el estado de los elementos de cada SCARA y banda transportadora, para luego tomar diferentes acciones para el correcto funcionamiento de la celda, en el subsistema de pick and place en los elementos SCARA se realizó la construcción de 8 piezas, compra de 1 elemento faltante; en el subsistema de control en el elemento tablero de control se adquirió 5 elementos también se realizó el diseño y fabricación de 3 elementos.

Se diseñó un control ON/OFF; para el encendido y apagado de la banda, el cual fue implementado con un módulo manual de control de la velocidad de motores DC con PWM, para controlar y variar la velocidad de la banda cuyo rango de velocidad varía entre $5.31 \frac{cm}{s}$ y $8.13 \frac{cm}{s}$ valores promedio, realizando las debidas consideraciones del amperaje que necesitaba el motor para su óptima operación.

Se realizó, el diseño e implementación de un sistema de alimentación para la celda, el cual, usó metodología de la QFD (Casa de la calidad) para la selección de la cada uno de los elementos mecánicos y eléctricos necesarios, Además, el sistema cuenta con sensores para la detección de material.

Se implementó un sistema de visión artificial, utilizando el Algoritmo de Rodríguez para el posicionamiento de objetos y la regulación de la cámara, Además, se utilizó un algoritmo predictivo del lugar que ocuparía la pieza en un determinado tiempo para la recolección y

clasificación de las piezas. Los cuales arrojaron una media de precisión de 84.17% con datos homogéneos y una distribución normal comprobada.

Se realizó una HMI; para controlar y supervisar el proceso de la celda, usando la norma ISA 101, el cual consta de una ventana producción; para activar el proceso de clasificación de piezas de manera automática en la celda y verificar el estado de cada uno de los elementos, una ventana; para controlar de forma manual el movimiento cada uno de los elementos de la celda, una ventana donde se muestra la visión artificial y la detección de pieza indicando el posicionamiento. Por último, una pantalla estadística donde muestra los histogramas de los datos recolectados del proceso de clasificación.

Se realizaron las debidas pruebas de reconocimiento de piezas y clasificación de manera continua, obteniendo como resultado un 95.89% de precisión general y una exactitud de 97.90% y una fiabilidad de 97.22% y 98.59% en el modelado del algoritmo de la visión artificial y en la clasificación un 83% de efectividad en el proceso continuo a través de lotes.

Se implementó una base de datos estable, multiplataforma de código gratuito que sea capaz de almacenar datos por minutos, horas, días, la cual es exportable en un solo archivo y sirve para la visualización de un histograma en el HMI, además es gratuita.

Recomendaciones

La celda inteligente tiene una buena precisión del 84.17% con un promedio de 15 segundo por pieza para clasificada. En la industria el proceso de clasificado necesita tener mayor velocidad por lo cual se recomienda implementar nuevos elementos que aporten a mejorar el los valores obtenidos.

Se realizó la evaluación, el mantenimiento preventivo y correctivo de los elementos del SCARAs y banda, se determinó que los actuadores, funcionan correctamente, pero están

próximo a cumplir la vida útil recomendada por los fabricantes, por lo que se recomienda implementar nuevos.

En la empresa de manufactura se ve; que los parámetros de operación son los más óptimos en tiempo y precisión, para que la celda se acerque a estos parámetros se recomienda, implementar sensores de mayor precisión dentro de los robots para poder e implementar; espacios de estados los cuales van a mejorar el control multivariable de los SCARAs y banda, de igual manera se recomienda realizar un diseño eléctrico de potencia el cual permita variar el PWM y poder controlar la velocidad de la banda.

El sistema de alimentación de la celda se encuentra en optimo estado, pero, se recomienda implementarle un sistema visión artificial robusto para el control de las piezas y el estado en el que se encuentra.

El reconocimiento de piezas que realiza la visión artificial, tiene valores óptimos y para poder mejorarlo se recomienda trabajar en un entorno de luz controlado; debido a que la visión artificial tiene una sensibilidad con el entorno.

La HMI implementada sirve para; controlar y supervisar el proceso de la celda, se con la norma ISA 101, pero como mejora, se recomienda poder realizar un HMI con normas HP para poder luego implementar sistemas SCADAS.

La celda tiene valores de precisión y exactitud, que pueden tender a variar con el deterioro del tiempo, se recomienda hacer pruebas trimestrales, para poder evaluar el estado de la celda y así realizar un plan de mejoras.

La base datos implementada es local, la cual permite obtener valores de manera real pero no remota. La mejora que se podría implementar hacer es: un sistema de base de datos en línea en el cual el usuario de manera remota pueda controlar y verificar el proceso de la celda.

Capítulo VI

Referencias bibliográficas

- Ansoategui, I. (2017). *Análisis mecatrónico de accionamientos de máquinas herramienta teniendo en cuenta la flexibilidad de la estructura.*
- Astudillo, A. (2020). *diseño y construcción de robot scara multiproposito.* Universidad de Chile.
- Barrientos, A., Peñin, L., & Balaguer, C. (2007). *FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA* (2a ed.). McGraw Hill.
- Botero, J. (2005). *CINEMÁTICA DE MANIPULADORES ROBÓTICOS.*
- Cardenas, L., & Campuzano, J. (2019). *ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLE.* UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO.
- Changoluisa, E. (2014). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SCARA QUE JUEGA DAMAS POR MEDIO DE VISIÓN ARTIFICIAL PROGRAMADO EN JAVA.* UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Córdova, A., & Quimbiamba, W. (2018). *DISEÑO, CONTROL E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA ROBOTIZADA PARA CLASIFICACIÓN DE PRODUCTOS MEDIANTE EL TRABAJO COLABORATIVO DE DOS ROBOTS SCARA.* Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Cuauhtémoc, O. (2018). La manufactura esbelta y su efecto en la continuidad de la micro y pequeña empresa. *Espacios*
- García, M. (2003). *“ROBOTRÓNICA APLICACIONES DE LA ROBÓTICA”.* Universidad Politécnica de Cataluña.
- Generalitat. (s/f). *ROBOTS INDUSTRIALES Y COBOTS.*

- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. (McGraw-Hill, Ed.; Tercera)
- ISA. (2015). *American National Standard, ANSI/ISA-101.01-2015: Human machine interfaces for process automation systems*.
- KUKA. (2017). *KUKA Sustainability Report*.
- Makris, S., Michalos, G., Eytan, A., & Chryssolouris, G. (2012). Cooperating robots for reconfigurable assembly operations: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 3(1), 346–351.
- Mayoral, E. (2017). *Automatización de una Celda Robótica con Retroalimentación Visual*.
- Morillo, diego, & Sosa, R. (2017). *Impacto en la productividad de la planta de sanitarios de Franz Viegner Ecuador de la aplicación de herramientas de manufactura esbelta en su proceso de manufactura*. Escuela politecnica nacional.
- Ocampo, J. (2019). *CELDA DE MANUFACTURA AUTOMATIZADA MEDIANTE LEGO MINDSTORMS EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE*.

Apéndices