



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO, CONTROL E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA
ROBOTIZADA PARA CLASIFICACIÓN DE PRODUCTOS MEDIANTE
EL TRABAJO COLABORATIVO DE DOS ROBOTS SCARA**

AUTORES: CÓRDOVA ARIAS, ALEXANDER FABRICIO

QUIMBIAMBA AYOL, WILLIAM PAÚL

DIRECTOR: MSC. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2018



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**Diseño, control e implementación de una celda robotizada para clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA**" fue realizado por los señores **Córdova Arias, Alexander Fabricio** y **Quimbiamba Ayol, William Paúl**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 7 de septiembre de 2018



MSc. DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE

C.C: 170866154-9



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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Córdova Arias, Alexander Fabricio*, con cedula de identidad N° 1722786231 y *Quimbiamba Ayol, William Paúl* con cedula de identidad N° 1723027775 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Diseño, control e implementación de una celda robotizada para clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA*, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 20 Agosto del 2018

Alexander Fabricio Córdova Arias

172278623-1

William Paúl Quimbiamba Ayol

172302777-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Córdova Arias, Alexander Fabricio y Quimbiamba Ayol, William Paúl autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Diseño, control e implementación de una celda robotizada para clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 Agosto del 2018

Alexander Fabricio Córdova Arias

CC: 172278623-1

William Paúl Quimbiamba Ayol

CC: 172302777-5

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mis amados padres Luis y Mariana, quienes me han apoyado en todo momento a lo largo de toda mi vida, siempre dándome sus sabios consejos y no permitir que me rinda ante cualquier adversidad, gracias a su esfuerzo y sacrificio he logrado terminar mi carrera universitaria. A mis hermanas Karen y Nayeli quienes han sido un motivo muy importante por el cual salir adelante en mi vida y darme su cariño y apoyo. A mi abuelita Rosa quien ha estado conmigo toda mi vida cuidándome, dándome su amor y comprensión, acompañándome cada tarde de estudios y siempre regalándome momentos de paz y alegría a su lado.

Alexander Fabricio Córdova Arias

DEDICATORIA

A Dios por haberme guiado por el camino correcto, por darme salud para poder lograr mis objetivos, darme las fuerzas necesarias para superar todos los obstáculos que se me han presentado y no desmayar en el intento y por haber puesto en mi camino a todas aquellas personas que han sido parte importante en toda mi vida.

A mis padres, por siempre estar a mi lado siendo mi apoyo incondicional, por darme todo lo que he necesitado para concluir con mi carrera, por ayudarme a ser una persona de bien con valores, principios, empeño y perseverancia para conseguir todos mis objetivos.

A mis hermanos, Byron, Dayana, Brithany que siempre han estado junto a mí, brindándome su apoyo y dando las fuerzas para seguir adelante.

A mi familia en general, por brindarme su apoyo incondicional cuando lo he necesitado y por estar conmigo en buenos y malos momentos.

William Paúl Quimbiamba Ayol

AGRADECIMIENTO

Principalmente agradezco a Dios y a la Virgencita de El Quinche por darme la fuerza, sabiduría, paciencia e inteligencia para afrontar cada obstáculo, por darme vida, salud y sobre todo por bendecirme con una familia maravillosa quienes han sido el pilar principal para terminar mi carrera.

A mi madre Mary, por ser mi ejemplo de vida y enseñarme a salir adelante siempre con la humildad de una persona sencilla pero con ganas de triunfar, y sobre todo por su esfuerzo y sacrificio por darme lo necesario lograr mis metas; a mi padre Luis por su sacrificio, entrega, por educarme para ser una personas de bien con buenos valores, y apoyarme en todo momento.

A mi abuelita Rosa quien siempre me acompaño a lo largo de mi vida, esperándome en casa con su amor y ternura, y que siempre me brinda sus palabras de aliento en cada adversidad.

A Diego, John mis amigos de toda la vida, más que eso mis hermanos quienes siempre me apoyan en todo sentido desde la parte académica y la parte personal, gracias por siempre tener palabras de aliento y apoyo cuando más lo necesité.

A mis compañeros de universidad, por hacer de cada día sea una aventura con nuevas experiencias, lecciones, con triunfos y derrotas, pero siempre apoyándonos. En especial a Ricardo, Paul, Jefferson y Yesenia por haber formado una amistad tan maravillosa.

Para terminar, un agradecimiento a los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, quienes impartieron sus conocimientos y experiencias a lo largo de toda mi vida universitaria, forjándome como profesional y sobre todo como persona. En especial al Ing. David Loza Matovelle por darme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos a lo largo de la realización de este trabajo.

Alexander Fabricio Córdova Arias

AGRADECIMIENTO

Primeramente quisiera agradecerle a Dios por ayudarme, bendecirme y por permitirme tener a toda mi familia a mi lado.

A mis padres, porque gracias a su apoyo y sacrificio me dieron la oportunidad de llegar a cumplir mi objetivo, por enseñarme a nunca rendirme ante los obstáculos, y que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr objetivos.

A la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE, por acogerme y darme la oportunidad de estudiar y realizarme como profesional.

A mi Director de Tesis, MSc. David Loza, por su generosidad al brindarme la oportunidad de acudir a su capacidad y experiencia fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, que durante toda mi carrera aportaron un granito de arena a mi formación.

A mis amigos, con quienes compartí grandes momentos, gracias por confiar en mí y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare.

Para todos ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

William Paúl Quimbiamba Ayol

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
SIMBOLOGÍA.....	xviii
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO 1	1
DESCRIPCIÓN DEL GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción	1
1.3 Planteamiento del Problema.....	4
1.4 Justificación e Importancia.....	5
1.5 Alcance.....	5
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo General.....	7
1.6.2 Objetivos Específicos	7
1.7 Estructura del documento.....	8
CAPÍTULO 2	9
MARCO TEÓRICO	9

2.1	Manipuladores Robóticos Industriales	9
2.1.1	Aplicaciones industriales y selección de manipuladores robóticos	10
2.2	Robot SCARA.....	11
2.2.1	Historia	11
2.2.2	Características Robot SCARA.....	12
2.2.3	Aplicaciones Robot SCARA	13
2.3	Cinemática y Dinámica de Manipuladores Robóticos	14
2.3.1	Cinemática.....	14
2.3.1.1	Cinemática Directa	15
2.3.1.2	Algoritmo Denavit-Hartenberg	16
2.3.1.3	Cinemática Inversa	17
2.3.1.3.1	Métodos de Resolución Cinemática Inversa	18
2.3.2	Dinámica de Robots Manipuladores	19
2.3.3	Modelo Dinámico Lagrange-Euler.....	20
2.4	Celda Flexible de Trabajo o Manufactura.....	21
2.4.1	Tipos de Celdas Flexibles de Manufactura.....	24
2.4.1.1	Celdas Atendidas.....	24
2.4.1.2	Celdas No Atendidas.....	24
2.4.1.3	De acuerdo a su disposición	25
2.4.2	Etapas para el diseño de celdas de manufactura.....	26
2.4.3	Disposición de un Robot Industrial en una celda de trabajo	27
2.4.4	Criterios de Implementación de un robot industrial en una celda	29
2.5	Sistemas de Visión Artificial en la Industria.....	31
2.5.1	Componentes de un Sistema de Visión	32
2.5.2	Elementos de la Visión Artificial	32
2.5.2.1	Iluminación o Fuente de Luz.....	32

2.5.3	Procesamiento de Imágenes.....	33
2.6	Robótica Colaborativa-Cooperativa.....	34
2.6.1	Componentes de una celda de ensamble con robots cooperativos	36
2.6.2	Arquitectura de los robots colaborativos	37
2.6.3	Implementación de una celda flexible con robots colaborativos.....	38
CAPÍTULO 3		40
METODOLOGÍA Y DISEÑO MECATRÓNICO		40
3.1	Matriz de Calidad	40
3.1.1	Definición de necesidades	40
3.1.2	Definición de características técnicas.....	41
3.1.3	Despliegue de la Función de Calidad QFD	42
3.2	Factibilidad y Planeación	44
3.3	Módulo 1. Robot SCARA	45
3.3.1	Subsistema 1. Cinemática y Dinámica	45
3.3.1.1	Cinemática.....	45
3.3.1.2	Dinámica	49
3.3.2	Subsistema 1. Geometría y Estructura Robot SCARA.....	60
3.4	Módulo 2. Celda Trabajo Colaborativo.....	71
3.4.1	Subsistema 1. Ampliación Banda Transportadora	71
3.4.1.1	Cálculo de Fuerzas, Torques y potencia requerida por el motor.....	72
3.4.1.2	Control Electrónico de la Banda	91
3.5	Módulo 3. Unidad de Control de la Celda de trabajo.....	92
3.5.1	Subsistema 1. Tarjeta de control.....	92
3.5.1.1	Tipo de Controlador	92
3.5.1.2	Algoritmo de Control	93
3.5.2	Subsistema 2. Visión Artificial y Predicción de posición	94

3.5.2.1	Visión Artificial.....	94
3.5.2.1.1	Iluminación y Ubicación de Cámara.....	94
3.5.2.1.2	Algoritmo de Visión de Artificial.....	95
3.5.2.2	Predicción de Posición de objetos.....	98
3.5.2.2.1	Modelamiento dinámico para el Filtro de Kalman.....	98
3.5.2.2.2	Algoritmo del Filtro Kalman.....	98
3.5.3	Subsistema 4. Control Robots y Trabajo Colaborativo (Planificador).....	100
3.5.3.1	Planificador de tareas.....	100
3.5.3.2	Posicionamiento de Robots.....	103
CAPÍTULO 4.....		107
CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS.....		107
4.1	Construcción de la Banda Transportadora.....	107
4.2	Construcción y ensamble del Robot SCARA de alta velocidad.....	109
4.3	Diseño final de la celda robotizada.....	113
4.3.1	Dimensiones de la celda.....	113
4.3.2	Disposición de la celda de trabajo y ubicación de los robots.....	113
4.4	Montaje del Tablero.....	114
4.5	Sistema Visión Artificial, Calibración de colores y reconocimiento de formas.....	115
4.6	Programación Celda de Trabajo.....	116
4.6.1	Programación ROS, mensajería, Publicador-Suscriptor.....	116
4.6.2	Archivo de mensajes (.msg).....	116
4.6.3	Publicador-Suscriptor.....	116
4.7	Pruebas de Funcionamiento.....	118
4.7.1	Pruebas posicionamiento robot SCARA.....	118
4.7.2	Prueba de funcionamiento planificador de tareas.....	121
4.7.3	Prueba funcionamiento celda de trabajo.....	121

4.8	Protocolo de Pruebas para la Celda de Trabajo.....	123
4.9	Análisis de resultados al implementar trabajo colaborativo en una línea de producción.	125
4.9.1	Análisis de tiempos de proceso	125
4.9.2	Análisis de Rendimiento de la celda de trabajo.....	127
CAPÍTULO 5		130
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS		130
5.1	Conclusiones.....	130
5.2	Recomendaciones	131
BIBLIOGRAFÍA.....		133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Parámetros Denavit-Hartenberg</i>	16
Tabla 2 <i>Métodos Resolución Cinemática Inversa</i>	19
Tabla 3 <i>Características requeridas de acuerdo a la aplicación</i>	30
Tabla 4 <i>Tipos iluminación en visión artificial</i>	32
Tabla 5 <i>Necesidades del usuario</i>	41
Tabla 6 <i>Especificaciones técnicas del proyecto</i>	41
Tabla 7 <i>Escala de relaciones entre requerimientos</i>	43
Tabla 8 <i>Escala de correlaciones</i>	43
Tabla 9 <i>Resultados matriz QFD</i>	43
Tabla 10 <i>Módulos y Subsistemas del proyecto</i>	44
Tabla 11 <i>Parámetros D-H Robot SCARA</i>	46
Tabla 12 <i>Parámetros D-H centros de masa</i>	49
Tabla 13 <i>Características Actuadores Robots SCARA</i>	60
Tabla 14 <i>Alternativas para material de los eslabones</i>	61
Tabla 15 <i>Ponderaciones de cada criterio para selección de alternativa</i>	62
Tabla 16 <i>Ponderación de cada Alternativa frente a cada criterio</i>	63
Tabla 17 <i>Selección de alternativa</i>	63
Tabla 18 <i>Ventajas y desventajas de los tipos de Accionamientos</i>	68
Tabla 19 <i>Alternativas para Accionamiento de brazos del robot</i>	69
Tabla 20 <i>Criterios para selección de tipo de accionamiento</i>	70
Tabla 21 <i>Ponderaciones de alternativas frente a cada criterio</i>	70
Tabla 22 <i>Selección alternativa de accionamiento</i>	71
Tabla 23 <i>Cargas Rodillo Motriz</i>	80
Tabla 24 <i>Características Eje Rodillo Motriz</i>	82
Tabla 25 <i>Significado y Valores de los términos para el diseño del eje</i>	85
Tabla 26 <i>Valores para determinar múltiplo de vida nominal</i>	88
Tabla 27 <i>Características chumacera CMB UFC204-12</i>	89
Tabla 28 <i>Comparación valores anteriores y actuales de la nueva de la banda</i>	89
Tabla 29 <i>Características Módulo PWM</i>	91

Tabla 30 <i>Características ATMEGA 2560</i>	92
Tabla 31 <i>Esquemas de comportamiento de robots en la celda</i>	101
Tabla 32 <i>Funciones Transferencia Actuadores Robot SCARA</i>	105
Tabla 33 <i>Prueba posicionamiento robot SCARA</i>	119
Tabla 34 <i>Características técnicas de los robots SCARA</i>	120
Tabla 35 <i>Tiempos de Clasificación</i>	125
Tabla 36 <i>Rendimiento de los Robots</i>	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Celda Flexible BJ-Gear.....	2
Figura 2 Celda de manufactura robotizada	3
Figura 3 Celda trabajo para clasificación de productos.	4
Figura 4 Esquema propuesto, celda de trabajo.....	7
Figura 5 Aplicaciones MRI.....	11
Figura 6 Robot SCARA	12
Figura 7 Volumen Trabajo Robot SCARA.....	12
Figura 8 Aplicaciones Robot SCARA con sistema de visión.....	13
Figura 9 Solución Industrial OMRON.....	14
Figura 10 Estudio Cinemático de un Manipulador Robótico.....	14
Figura 11 Problema Cinemático Directo.....	15
Figura 12 Parámetros Denavit-Hartenberg	17
Figura 13 Robot con coordenadas del extremo conocidos.....	18
Figura 14 Diagrama de un Robot de n grados de libertad.....	20
Figura 15 Esquema Celda Flexible Manufactura.....	22
Figura 16 Célula de Placa Refinadora totalmente Automática con Gaging y C.G.	23
Figura 17 Celda Atendida	24
Figura 18 Celda No Atendida	25
Figura 19 Tipos de Celdas según su disposición; (a) Línea, (b) En U, (c) Loop.....	26
Figura 20 (a) Esquema Robot centro de celda, (b) Aplicación Paletizado	28
Figura 21 (a) Esquema robot en línea, (b) aplicación, soldadura automotriz	28
Figura 22 Robot Móvil.....	29
Figura 23 Robot suspendido.....	29
Figura 24 Aplicaciones Visión Artificial en la Industria	31
Figura 25 Componentes de un Sistema de Visión	32
Figura 26 Procesamiento y Análisis de Imágenes.....	33
Figura 27 Trabajo Colaborativo entre robots	35
Figura 28 Red de conexiones entre dos robots cooperativos	36
Figura 29 Celda Flexible Robotizada Colaborativa	38

Figura 30 Matriz QFD del proyecto.....	42
Figura 31 Esquema robot SCARA, parámetros Denavit Hartenberg	45
Figura 32 Esquema para determinar Variables Articulares del Robot.....	48
Figura 33 Robot SCARA	49
Figura 34 Modelo Dinámico Robot SCARA en Simulink.....	57
Figura 35 Gráfica Torques Articulación 1	58
Figura 36 Torques en Articulación 2	58
Figura 37 Motor DC serie IG52	59
Figura 38 Diseño CAD robot SCARA.....	61
Figura 39 (a) Eslabón 2, (b) Eslabón 1	64
Figura 40 Cargas existentes en eslabón inferior	65
Figura 41 Diagrama de barra de eslabón inferior.....	65
Figura 42 Análisis CAE, eslabón inferior deformaciones	67
Figura 43 Análisis CAE, factor de seguridad.....	67
Figura 44 Diseño CAD extensión banda transportadora.....	72
Figura 45 Motor BOCH, Características Técnicas	76
Figura 46 Tensiones en la banda.....	76
Figura 47 Deformaciones en rodillo motriz	80
Figura 48 Factor de seguridad rodillo motriz.....	81
Figura 49 Elementos Rodillo Motriz.....	82
Figura 50 Diagrama de cuerpo libre del eje rodillo	82
Figura 51 Diagrama Fuerza Cortante y momento flector, ejes de rodillo motriz. (a) xz, (b) yz... 84	84
Figura 52 Diseño Final de Banda Transportadora	90
Figura 53 Módulo VNH2SP30.....	91
Figura 54 Controlador ATMEGA 2560.....	92
Figura 55 Etapas de control celda de trabajo	93
Figura 56 Iluminación tipo Frontal	94
Figura 57 Ubicación cámara	95
Figura 58 Piezas a clasificar.....	96
Figura 59 Algoritmo Visión Artificial	97

Figura 60 Algoritmo Filtro Kalman	99
Figura 61 Diagrama Planificador	100
Figura 62 Diagrama de acción de cada robot.	103
Figura 63 Lazo de Control Posicionamiento de Robots.....	104
Figura 64 Corte de tubos de acero.....	108
Figura 65 Soldadura y pintura de la estructura	108
Figura 66 Eslabones Robot SCARA	109
Figura 67 Acoples Motor	110
Figura 68 Estructura Externa Robot.....	110
Figura 69 Ensamble Robot SCARA	111
Figura 70 Base fija robot SCARA	111
Figura 71 Montaje articulación prismática robot SCARA.....	112
Figura 72 Montaje final robot SCARA	112
Figura 73 Dimensiones de la celda de trabajo	113
Figura 74 Disposición de la celda de trabajo y ubicación de los robots	114
Figura 75 Celda de Trabajo Final.....	114
Figura 76 Tablero de control.....	115
Figura 77 Pruebas reconocimiento de colores y formas	115
Figura 78 Archivo .msg.....	116
Figura 79 Diagrama de nodos, Celda de trabajo	117
Figura 80 Pruebas posicionamiento robot SCARA	119
Figura 81 Funcionamiento Planificador.....	121
Figura 82 Funcionamiento celda de trabajo, reconocimiento de colores.....	122
Figura 83 Reconocimiento de formas	122
Figura 84 Clasificación de productos estado (a)	123
Figura 85 Clasificación de productos estado (b).....	124
Figura 86 Clasificación de productos estado (c)	124

SIMBOLOGÍA

T_n^0	Matrices Transformación Homogénea
q_n	VARIABLES ARTICULARES GENERALIZADAS
\mathcal{L}	Función Lagrangiana
\mathcal{K}	Energía cinética
\mathcal{U}	Energía Potencial
τ	Vector de fuerzas y pares en las articulaciones
0A_1	Matrices de Transformación
x	Coordenada en el eje “x”
y	Coordenada en el eje “y”
z	Coordenada en el eje “z”
d	Variable prismática robot SCARA
\mathcal{L}	Función Lagrangiana
\mathcal{K}	Energía Cinética
\mathcal{U}	Energía Potencial
τ	Vector de Fuerzas y pares
$J_v(q)$	Velocidades lineales
$J_w(q)$	Velocidades angulares
Z_i	Ejes de movimiento del centro de masa i
$O(q)$	Centros de giro eslabones
J_i	Jacobiano del centro de masa i
J_{i1}	Jacobiano de velocidades lineales en el centro de masa i
J_{i2}	Jacobiano de velocidades angulares de masa i
$H(q)$	Matriz de Inercias
$R(q)$	Matrices de Rotación
I_i	Tensores de Inercia de cada eslabón
m_i	Masa del eslabón i -ésimo

$C(q, \dot{q})$	Matriz de Aceleraciones Centrípetas y de Coriolis
y_{max}	Deformación máxima
E	Módulo de elasticidad
I	Momento de inercia eslabón
Q_t	Capacidad de carga
v	Velocidad de la banda
A	Área transversal del producto a transportar
ρ	Densidad
k	Factor por inclinación de banda
C	Coefficiente de fricción
f	Coefficiente de fricción partes móviles
F_1	Fuerza para mover banda sin carga
F_2	Fuerza para mover banda con carga
P	Potencia Teórica
P_s	Potencia adicional por guías
F_3	Fuerza para mover verticalmente la carga
P_T	Potencia total
η	Eficiencia Motor
ε	Eficiencia por la transmisión
T_e	Tensión efectiva
T_1	Tensión lado ajustado banda
T_2	Tensión lado flojo banda
m	Coefficiente de accionamiento banda
μ	Coefficiente fricción entre banda y tambor
θ	Ángulo contacto banda y tambor
T_μ	Tensión trabajo unitaria
B	Ancho de banda
s	Factor seguridad

D_C	Diámetro cilindros
ω, n	Velocidad angular (rpm)
r	Radio cilindros
T	Torque en rodillos
M	Momento
F_a	Fuerza Axial
F_r	Fuerza radial
X	Factor radial
Y	Factor axial
C_d	Capacidad de carga dinámica (kN)
a_f	Factor de aplicación
X_D	Múltiplo de vida nominal
P	Carga dinámica equivalente (kN)
p	Exponente de vida
x_0	Vector de estado inicial del sistema
H	Matriz de transición filtro de Kalman
K_p	Constante proporcional controlador PID
K_I	Constante Integral controlador PID
K_d	Constante derivativa controlador PID
c_e	Capacidad de diseño
c_e	Capacidad efectiva
p_r	Producción real
Y	Yield (Rendimiento)
D	Defectos
U	Unidades totales
Y_t	Rendimiento total

RESUMEN

El documento detalla el diseño, construcción e implementación de una celda robotizada para clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA. El objetivo es aplicar el concepto de trabajo colaborativo entre dos manipuladores en una celda de trabajo con el fin de aumentar la producción en un determinado proceso industrial, teniendo en cuenta posibles fallas y sus respectivas acciones para corregirlas y asegurar el funcionamiento adecuado del proceso. En los dos primeros capítulos se da un enfoque general a la robótica en la industria, aplicaciones, nuevas tecnologías, ventajas y desventajas, etc., posteriormente se aborda los conceptos básicos y generales a usar en el proyecto. En los capítulos 3 y 4 se desarrolla el diseño total de cada parte de la celda; realizando los cálculos necesarios para posteriormente realizar su construcción, ejecutando las pruebas necesarias para constatar el funcionamiento adecuado de la celda. Se construye un segundo robot SCARA considerando los criterios y pasos para la construcción de un robot, se aplicó filtro de Kalman en la celda robotizada el cual hará la función de predictor de posición. Se implementa un planificador de tareas, finalmente se programa 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 realiza un análisis de ventajas al aplicar trabajo colaborativo en una estación de trabajo robotizada, mediante el cálculo de producción y rendimiento general de la celda antes y después de instalar el segundo robot.

PALABRAS CLAVE

- **TRABAJO COLABORATIVO**
- **ROBOT SCARA**
- **CELDA DE TRABAJO**
- **PLANIFICADOR DE TAREAS**

ABSTRACT

The detailed document design, construction and implementation of a robotic cell for product classification by the collaborative work of two SCARA robots. The principal objective is to apply the concept of collaborative work among manipulators in a work cell in order to increase production in a certain industrial process, taking into account possible failures and their respective actions to correct and ensure the proper functioning of the process. In the first two chapters there is a general approach to robotics in industry, applications, new technologies, advantages and disadvantages, etc., then the basic and general concepts to be used in the Project are addressed. In chapter three and four, the total design of each part of the cell is developed; performing the necessary calculations to subsequently carry out its construction and implementation, executing the necessary test to verify the proper functioning of the cell. A second SCARA robot is built considering the criteria and steps for the construction of a robotic manipulator, Kalman's filter was applied in the automated cell which will do the function of predictor of position for the objects that they find on the belt conveyor. A planner of tasks is implemented for the control of every robot, finally the whole process is programmed across nodes in to the ROS environment in order is able to monitor each of them and HMI is designed for the user. Additionally, an analysis of advantages is realized on having applied collaborative work in a work cell, by means of the calculation of production and general yield of the cell before and after installing the second robot.

KEYWORDS:

- **COLLABORATIVE WORK**
- **SCARA ROBOT**
- **WORK CELL**
- **PLANNING TASK**

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL GENERAL DEL PROYECTO

1.1 Introducción

El potencial de las soluciones eficaces de una producción, se puede encontrar en la utilización de múltiples robots en un lugar de trabajo o en la utilización de múltiples robots cooperativos para realizar tareas comunes.

En el último período se pueden observar cambios significativos en el desarrollo de la robótica. Mientras las configuraciones de los robots industriales se estabilizan, sus parámetros y posibilidades de utilización se expanden significativamente. Las células multi-robot representan el concepto de un lugar de trabajo con múltiples robots cuyas actividades están coordinadas. Incluso en los últimos años, se construían lugares de trabajo robóticos con múltiples robots, pero sus actividades eran autónomas sin la posibilidad de coordinación mutua.

Actualmente, se requiere que la mayoría de productos que se introducirán al mercado tengan un tiempo de elaboración muy corto, de manera que sus costos se reduzcan lo más y así obtener una producción rentable. Lo cual se logra mediante la introducción de nuevas herramientas que nos garanticen lo antes mencionado, hoy en día las herramientas o máquinas que cada vez son más indispensables a nivel industrial son los robots o manipuladores industriales, y sobre todo de células robotizadas.

1.2 Antecedentes

En la industria actual las celdas flexibles tienen un grado de automatización de gran nivel. Sin embargo, siempre se requiere un mayor nivel de la misma al momento de implementarla, ya sea en robustez, precisión, rapidez de operación, etc. Las celdas flexibles de producción se pueden ajustar

a las necesidades del mercado, ya que están constituidas principalmente por máquinas de control numérico y robots. Las células flexibles disminuyen el tiempo del ciclo de trabajo la elaboración de un producto y a la vez liberan a las personas de los trabajos desagradables y repetitivos. En países industrializados, debido a la precisión y versatilidad de los robots industriales se utilizan para operaciones de manufactura.

En Europa se ha venido dando un avance tecnológico a tal magnitud que han logrado reducir al máximo los costos de producción en sus productos y al mismo tiempo aumentado la calidad de estos. Uno de los casos prácticos de automatización fue la incorporación de cuatro brazos robóticos a la plantilla de BJ-Gear. (Universal Robots , 2016). Cada manipulador se encarga de realizar un proceso diferente como pintado de engranajes, desbarbado, estampado y terminado de piezas. Ver Figura 1.



Figura 1 Celda Flexible BJ-Gear

Fuente: (Universal Robots , 2016)

En el caso de América latina países como México, Argentina y Chile han acoplado robots industriales en sus procesos de fabricación, por ejemplo en Argentina la empresa PRODISMO cuenta con una celda de mecanizado de Moldes. (Garza, 2009). En el Ecuador a medida que se va modernizando los procesos en las industrias existentes en el país, se han ido introduciendo robots industriales especialmente en los procesos de paletizado y soldadura.

En el país ha existido un avance tecnológico importante debido al interés de personas e industrias en temas de robótica industrial y a la necesidad de optimización de tiempo, recursos y liberación de personal designado a tareas repetitivas y de alta precisión.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se ha dado lugar al desarrollo de varios proyectos que contemplan el diseño y construcción de procesos automatizados, tal es el caso de “Diseño e Implementación de una Celda de Manufactura Robotizada, para la Réplica de Piezas 3D, mediante fresado en el Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE-EL” (Acuña, Singaña, Acosta, & Caizalitin, 2015). Ver Figura 2.



Figura 2 Celda de manufactura robotizada
Fuente: (Acuña, Singaña, Acosta, & Caizalitin, 2015)

Otros ejemplos de proyectos que se han realizado en la Institución impulsando el desarrollo de la automatización industrial son: “Diseño y construcción de un torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta empernada en una celda de trabajo” (Carvajal & Martinez, 2016), y también “Diseño y construcción de una celda de trabajo para clasificación de piezas en movimiento con un robot SCARA” (Montufar & Salazar, 2017). Ver Figura 3.



Figura 3 Celda trabajo para clasificación de productos.

Fuente: (Montufar & Salazar, 2017)

El presente proyecto propone la optimización de una celda de trabajo de clasificación de productos en una cinta transportadora el cual cuenta con un robot SCARA, realizando una adecuación de la misma añadiendo un segundo robot SCARA de alta velocidad, el mismo que realizará trabajo colaborativo con el primer robot y de esta manera obtener una nueva celda flexible robotizada con un alto nivel de producción.

1.3 Planteamiento del Problema

Actualmente, las industrias están en la búsqueda permanente de optimizar y ser más eficientes en sus procesos, y los principales aspectos a tomar en cuenta son: reducción de costos, reducción de tiempos de producción, disponibilidad y calidad. Es por ello que se han ido introduciendo métodos que a nivel mundial han ido desarrollándose con el fin de cumplir dichos objetivos, los cuales en nuestro país se están empezando a conocer e implementar.

En industrias en las cuales se tiene procesos repetitivos, en los cuales se requiere una alta eficiencia en su ejecución, tiempos cortos, entre otros aspectos; generalmente se incluye en robot industrial, pero aún con un robot industrial que a simple vista cumple con su objetivo, existen ciertos procesos que demandan la inclusión de más de un robot. De tal manera que se logren los aspectos señalados anteriormente, a pesar de introducir en una celda más de un robot, se necesita

que éstos interactúen entre sí en tiempo real, es decir realicen un trabajo coordinado en la ejecución de una determinada tarea, (actúen de manera inteligente) al realizar dichas acciones.

1.4 Justificación e Importancia

La flexibilidad en un determinado proceso es de gran importancia y necesaria para asegurar una producción óptima y de mejor calidad en una industria. Sin embargo, dicha flexibilidad demanda mayores conocimientos y una tecnología avanzada. Al introducir robots industriales se logrará el objetivo de reducir tiempos en la realización de una determinada tarea y de ésta manera obtener una mayor eficiencia y calidad, como consecuencia de lo anteriormente dicho se podrá lograr el objetivo principal de cualquier compañía, la cual es la reducción de costes de producción, que se obtiene de las mejoras tecnológicas y del uso adecuado de los recursos los cuales asegurarán calidad, eficiencia, etc.

De tal manera al ser la automatización y la robótica industrial nuevas áreas en nuestro país y al ver la necesidad de su desarrollo se propone el presente trabajo con el fin de mejorar los procesos industriales en los cuales se vean inmersas tareas repetitivas. De igual manera seguir en el estudio en el área de robótica industrial para la cual se dejará a disposición todo el prototipo de la nueva celda para futuros proyectos y mejoras al mismo.

Con la realización del proyecto se pretende mejorar la ejecución de un determinado proceso industrial, dando la pauta para la optimización de los diferentes procesos industriales en el país y empezar a incursionar en las nuevas tecnologías de la industria moderna con el fin de desarrollar un prototipo a gran escala de un proceso productivo completo.

1.5 Alcance

El proyecto a realizarse tiene como objetivo optimizar el proceso de clasificación de productos en movimiento con un robot SCARA, mediante el uso de software libre y visión artificial. La celda de trabajo constara con un segundo robot SCARA de alta velocidad el cual realizará trabajo colaborativo con el primer robot y así lograr una mayor eficiencia en el proceso de clasificación de productos.

Los efectores finales de los dos robots serán dos actuadores magnéticos, que realizarán la tarea de tomar el objeto a ser clasificado. La estructura de la banda transportadora se realizará una ampliación de tal manera que se pueda obtener un área de trabajo adecuada para cada robot SCARA, se realizará una readecuación del sistema de visión artificial con el fin de que abarque una mayor área y se obtenga una mayor retroalimentación para la detección de los productos presentes en la banda transportadora.

Las tareas a realizarse en la nueva celda de trabajo serán:

- Ampliación de banda transportadora.
- Readecuación del sistema de visión artificial.
- Construcción de un robot SCARA de alta velocidad.
- Implementación de trabajo colaborativo entre dos robots SCARA para la clasificación de productos en movimiento constante.
- Estimar las posiciones de los productos, aplicando filtro de Kalman, y definir la trayectoria a tomar para el efector final de cada robot.
- Diseño de una interfaz humano-máquina que permitirá al operario la supervisión de todo el proceso.

En la Figura 4 se puede observar el esquema propuesto (Montufar & Salazar, 2017), la cual se tomará como punto de referencia para el presente proyecto.

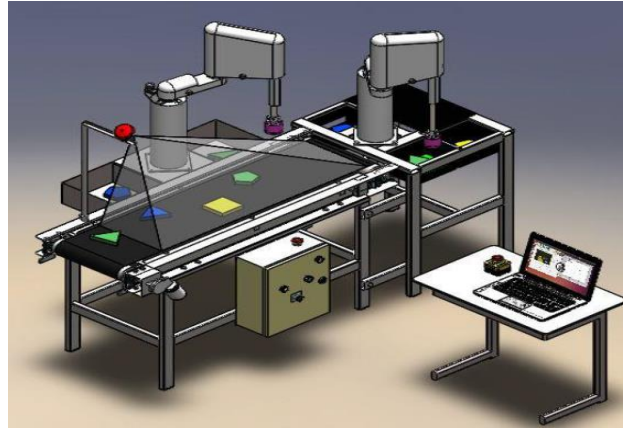


Figura 4 Esquema propuesto, celda de trabajo.
Fuente: (Montufar & Salazar, 2017)

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Diseñar e implementar una celda robotizada para la clasificación de productos mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diseño mecatrónico de un robot SCARA de alta velocidad.
- Diseñar e implementar la ampliación de una banda transportadora para una celda de trabajo.
- Implementar el trabajo colaborativo entre dos robots SCARA para el proceso de clasificación de productos.
- Diseñar e implementar una unidad de control que será la encargada de asignar tareas a cada robot SCARA.
- Verificar y constatar el perfecto funcionamiento de la nueva celda de trabajo con el trabajo colaborativo entre los dos robots.

1.7 Estructura del documento

Para el desarrollo del presente proyecto se tiene cinco capítulos, en el capítulo 1 se encuentra detallado los aspectos generales del proyecto como son, descripción, justificación, objetivos y de una manera general el desarrollo y avances en procesos industriales a nivel internacional y local.

En el capítulo 2 se presenta el Marco Teórico del proyecto, en el que se detalla las definiciones básicas y específicas de componente que formara parte del proyecto final, como son control de manipuladores robóticos, trabajo colaborativo, filtro de Kalman.

En el capítulo 3, se tiene el diseño detallado de cada módulo y subsistema del proyecto, éstos son, diseño y control de un robot SCARA, desarrollo del algoritmo de Kalman para una celda robotizada, implementación de un planificador de tareas.

En el capítulo 4 se tiene toda la construcción del robot SCARA, banda transportadora, al igual que la implementación del filtro de Kalman y del planificador de tareas que se encargará del funcionamiento de toda la celda de trabajo, finalmente se realiza un análisis de ventajas al implementar trabajo colaborativo en un estación de trabajo frente a una celda con un único manipulador.

Para terminar en el capítulo 5, se dan conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron durante el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El capítulo presenta de forma general la definición, clasificación y aplicaciones de manipuladores robóticos industriales; al igual que una breve descripción del robot SCARA su cinemática y dinámica, criterios de selección y campos de aplicación. Se presenta también una descripción de lo que es una celda de trabajo robotizada, elementos, criterios de implementación, características, etc. Y finalmente un apartado que trata sobre la robótica colaborativa, su aplicación en la industria y su implementación en una celda flexible de manufactura.

2.1 Manipuladores Robóticos Industriales

Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, enfocado a mover objetos, herramientas, etc, o dispositivos inteligentes programados para la ejecución de varias tareas. (Ibarra, 2017)

En este aspecto existen 5 configuraciones, las cuales se definen de acuerdo al tipo de articulación y movimiento, las cuales son:

- Cartesiano
- Cilíndrico
- Esférico o Polar
- Antropomórfico o Articulado Verticalmente
- SCARA o Articulado Horizontalmente

2.1.1 Aplicaciones industriales y selección de manipuladores robóticos

Actualmente los manipuladores han ido tomando una importancia a nivel industrial, debido a que para cada tarea se han introducido manipuladores los cuales cumplen con diversas tareas, mejorando la calidad de dicha tarea y aumentando su eficiencia.

Los manipuladores en esencia son para librar a los usuarios u operaciones de tareas cansadas, repetitivas y sobre todo evitar de ciertos peligros. Entre este tipo de aplicaciones se tiene:

- Carga y Descarga
- Soldadura
- Corte
- Paletizado y empacado
- Pintura
- Traslado
- Pintura

Al momento de designar el manipulador correcto para realizar cierta aplicación, es necesario tener en cuenta algunas características y especificaciones del proceso. Con estas especificaciones se podrá elegir el manipulador adecuado el cual cumplirá con dicha tarea. Las aplicaciones en donde las industrias ocupan un robot o manipulador industrial se puede observar en la Figura 5.

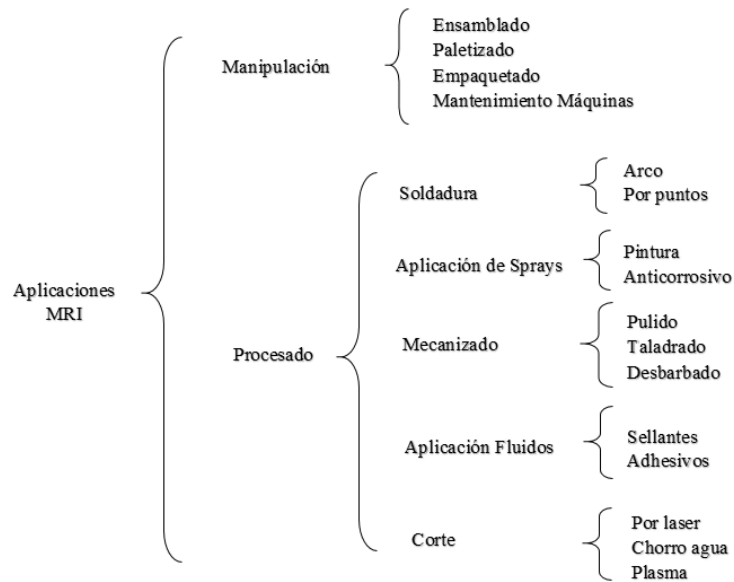


Figura 5 Aplicaciones MRI

Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

2.2 Robot SCARA

2.2.1 Historia

Esta configuración fue desarrollada por el profesor Hiroshi Makino en la Universidad de Yamanashi en Japón en 1979, su acrónimo significa “*Selective Compliance Assembly Robot Arm*”. El SCARA de 4 grados de libertad tenía un diseño único que ningún otro brazo robótico tenía en aquel tiempo, lo caracterizaba su simplicidad de operación ya que con una cantidad reducida de movimientos podía realizar más que los otros manipuladores y con una velocidad y precisión alta.

Este tipo de robot fue introducido comercialmente en el año de 1981, a pesar de que actualmente en la industria existen manipuladores articulados de 6 grados de libertad los cuales se utilizan en aplicación de manejo de materiales, quienes han trabajado en la industria varios años aseguran que el mejor robot para el manejo de materiales, objetos etc, es el robot SCARA. (VINSSA, 2017)

2.2.2 Características Robot SCARA

El robot SCARA posee 3 articulaciones que son las siguientes: 2 articulaciones rotacionales y 1 articulación lineal o prismática. Las dos primeras se mueven paralelamente entre ellas, mientras que la tercera articulación lo hace en un plano perpendicular al de las anteriores. En la Figura 6 se puede observar las articulaciones y el movimiento de este tipo de robot.

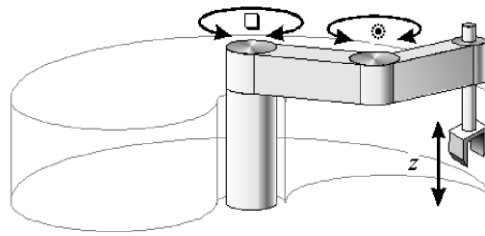


Figura 6 Robot SCARA

El robot SCARA también se lo conoce por sus movimientos rápidos y precisos, pero tiene un inconveniente ya que solo puede tener accesos a zonas de trabajo que se encuentren perpendicularmente a su eje prismático, de tal modo que se puede decir que posee libertad en los movimientos de los ejes X e Y pero limitados en el eje Z, esto debido a que en su muñeca tiene movimientos muy limitados. A nivel industrial, presentan un volumen de trabajo irregular. Ver Figura 7.

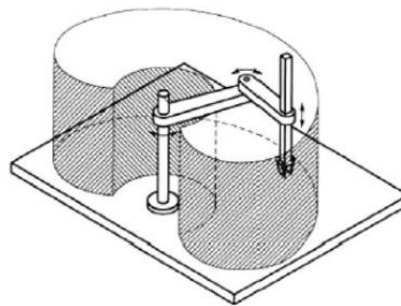


Figura 7 Volumen Trabajo Robot SCARA

Fuente: (Sanchez, 2008)

2.2.3 Aplicaciones Robot SCARA

El robot SCARA posee un amplio campo de aplicación industrial, sobre todo en aquellas aplicaciones que se realizan en un plano. Las aplicaciones donde más se utiliza este tipo de robot son:

- Dispensar o distribuir
- Soldadura
- Colocar, clasificar
- Guiado
- Montaje de componentes (principalmente en la electrónica)
- Atornillar
- Medicina

En algunas de las aplicaciones antes mencionadas se requiere el guiado por visión artificial, de este modo algunos modelos de robots vienen incluidos un hardware y software para el procesamiento de imágenes, con estos accesorios se llega a obtener una mayor eficiencia en las diferentes aplicaciones. En la Figura 8 se puede observar varias aplicaciones del robot SCARA en las cuales utiliza un sistema de visión.

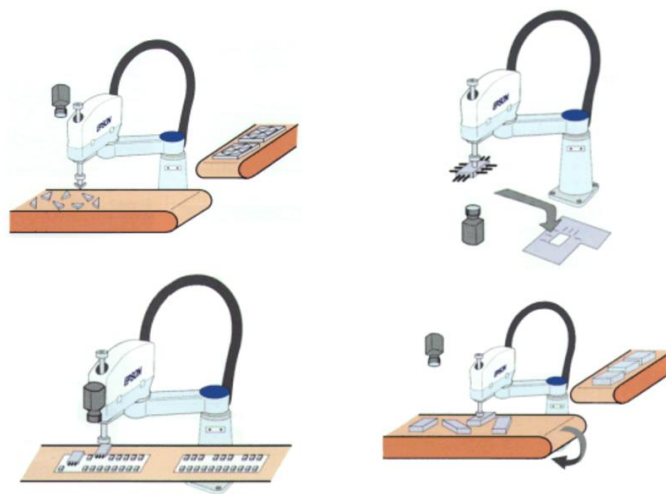


Figura 8 Aplicaciones Robot SCARA con sistema de visión.

Fuente: (Villafañe & Peña, 2012)

En la Figura 9 se puede ver una aplicación real a nivel industrial mediante un robot SCARA con la ayuda de visión propuesta por OMRON, en una “Jornada sobre soluciones en Mecatrónica, Robótica y Visión Artificial para la Industria”. (OMRON, 2014).



Figura 9 Solución Industrial OMRON
Fuente: (OMRON, 2014)

2.3 Cinemática y Dinámica de Manipuladores Robóticos

2.3.1 Cinemática

La cinemática de un manipulador robótico se encarga del estudio del movimiento del mismo con respecto a un punto o sistema de referencia. En este sentido dicho estudio no considera las fuerzas/momentos que actúen sobre el sistema, sino que únicamente interviene 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 10: (Jaramillo Botero, 2005)

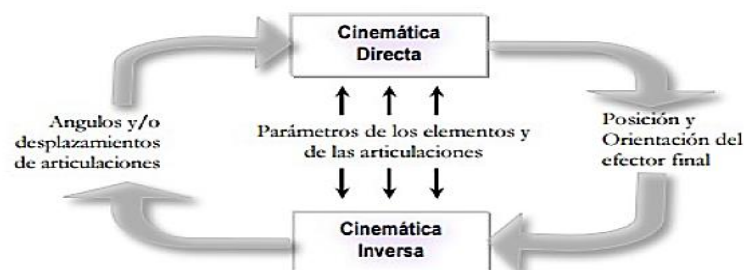


Figura 10 Estudio Cinemático de un Manipulador Robótico
Fuente: (Jaramillo Botero, 2005)

2.3.1.1 Cinemática Directa

En el estudio de la cinemática directa, el problema se reduce a encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo, al sistema de coordenadas de referencia (Fu, Gonzalez, & Lee, 2006). En el cual se conoce los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos del robot (Ver Figura 11), por lo que la posición del efector final estará definida como una expresión en función de las variables articulares, como se puede ver en la ecuación (2. 1).

$$P(x, y, z, th1, th2, th3) = f(q1, q2, q3, q4, q5, q6) \quad (2. 1)$$

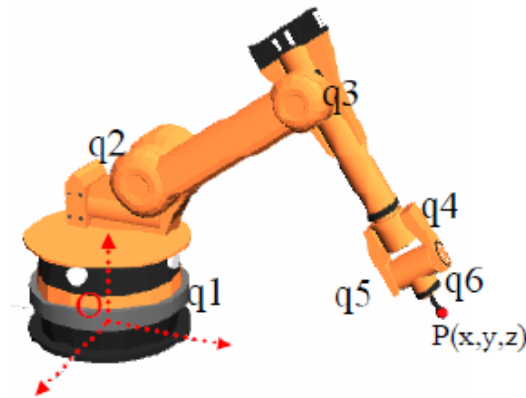


Figura 11 Problema Cinemático Directo
Fuente: (Ibarra, 2017)

Para el estudio directo, definiremos un sistema coordenado a cada eslabón, desde el eslabón 0 (base fija robot) hasta el eslabón n (efector final). Entonces, la transformación de coordenadas que describe la posición y la orientación del sistema coordenado n (efector final) con respecto al 0 (base) está dado por:

$$T_n^0 = A_1^0 \times A_2^1 \times \dots \times A_n^{n-1} \quad (2. 2)$$

Entonces, como ya se dijo, el cálculo de la cinemática directa es recursiva, la cual se obtendrá por productos simples de matrices de transformación homogénea A_i^{i-1} , $i = 1, 2, \dots, n$, donde cada una de las matrices corresponde a una sola variable articular. (Barahona Avalos, 2011).

Teniendo la matriz de transformación:

$$A = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ F_{1 \times 3} & W_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.3.1.2 Algoritmo Denavit-Hartenberg

Este método se utiliza para resolver de forma trivial el problema de la cinemática directa, y como punto de partida para plantear el problema de la cinemática inversa. Los parámetros de Denavit-Hartenberg son relativos al tamaño y forma del eslabón y se indican en la Tabla 1:

Tabla 1
Parámetros Denavit-Hartenberg

Parámetro	Significado	Representa
a_i	Distancia de separación desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo a lo largo del eje x_i (o la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i en articulaciones prismáticas)	Longitud Eslabón
α_i	Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} al eje z_i respecto al eje x_i	Ángulo Torsión Eslabón
d_i	Distancia desde el origen de coordenadas i -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i a lo largo del eje z_{i-1} . Variable en articulaciones prismáticas.	Longitud Articular
θ_i	Ángulo de la articulación del eje x_{i-1} al eje x_i , respecto del eje z_{i-1} . Variable en articulaciones giratorias	Ángulo Articular

En la Figura 12 se muestran los parámetros descritos y su relación gráficamente

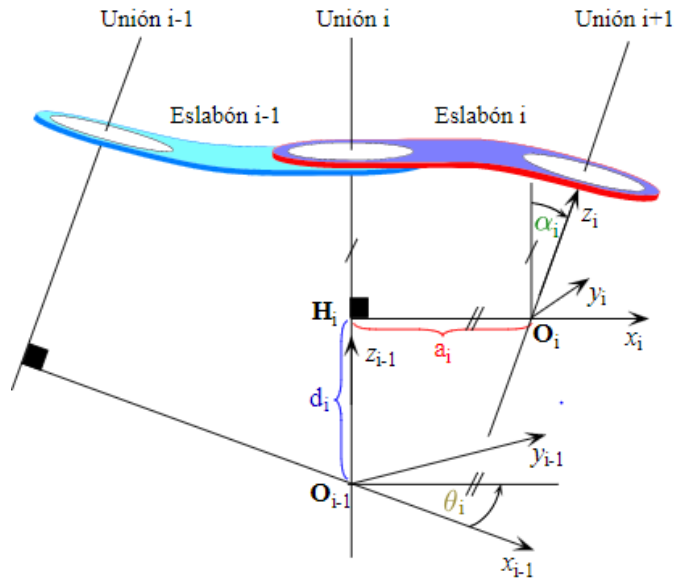


Figura 12 Parámetros Denavit-Hartenberg

Una vez determinado los parámetros D-H, las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot se calcula de forma inmediata, ya que vienen dadas por las matrices A, las cuales están definidas por la ecuación (2. 4):

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.3.1.3 Cinemática Inversa

En la resolución de la cinemática inversa, el objetivo es encontrar los valores que deben adaptar las coordenadas articulares del robot, para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Ver Figura 13. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

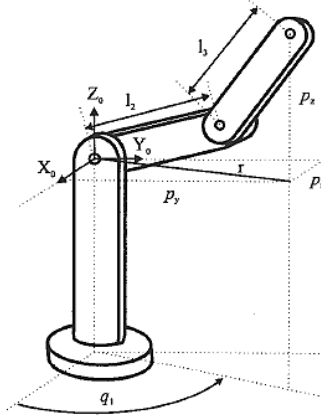


Figura 13 Robot con coordenadas del extremo conocidos

Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

En la cinemática directa es posible abordarla de una manera sistemática a partir de las matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, lo cual no ocurre en el problema inverso ya que las ecuaciones en esta resolución están fuertemente ligadas a la configuración del robot.

2.3.1.3.1 Métodos de Resolución Cinemática Inversa

Debido a que el problema cinemático inverso se obtienen ecuaciones simultaneas de carácter no lineal, las cuales pueden tener múltiples soluciones, o a su vez posibilidad de no tener solución, etc. Existen métodos para la solución de dichas ecuaciones en la Tabla se dan a conocer los más comunes.

Tabla 2
Métodos Resolución Cinemática Inversa

Método	Características
Geométrico	<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente se utiliza para las primeras variables articulares • Utiliza relaciones geométricas y trigonometrías, para su resolución.
A partir Matriz Transformación homogénea	<ul style="list-style-type: none"> • Obtiene cinemática directa y se obtienen las matrices A. • Despeja las n variables q_i en función de las componentes de los vectores n, o, a y p • Por complejidad a menudo este método no se utiliza.
Desacoplo Cinemático	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza en manipuladores de 6 GDL • Separa orientación y posicionamiento

2.3.2 Dinámica de Robots Manipuladores

En el estudio dinámico de un robot, se obtienen las relaciones entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que origina en el mismo. El modelo dinámico de un robot relaciona lo siguiente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

- Localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización del extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración
- Fuerzas y pares aplicados en las articulaciones.
- Parámetros dimensionales del robot, longitud, masa e inercias.

La obtención del modelo dinámico de un robot es uno de los aspectos más complejos en robótica, a tal punto que ha sido obviado en varias ocasiones. Sin embargo, es importante para los siguientes aspectos (Saltaren, 1996):

1. Simulación del movimiento del robot
2. Diseño y evaluación de la estructura mecánica del robot
3. Dimensionamiento de los actuadores
4. Diseño y evaluación del control dinámico del robot

Para el modelo dinámico se tiene varios métodos, los cuales son:

- Lagrange-Euler
- Newton-Euler
- Variables de Estado
- Espacio de la Tarea

2.3.3 Modelo Dinámico Lagrange-Euler

Para obtener el modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad como el de la Figura 14, se puede utilizar las ecuaciones de movimiento de Newton. Sin embargo, a medida que aumentan los grados de libertad del manipulador dicho método presenta complicaciones en su análisis. Por tal motivo que para estos casos es más conveniente utilizar las ecuaciones de LaGrange. (Kelly & Santibañez, 2003)

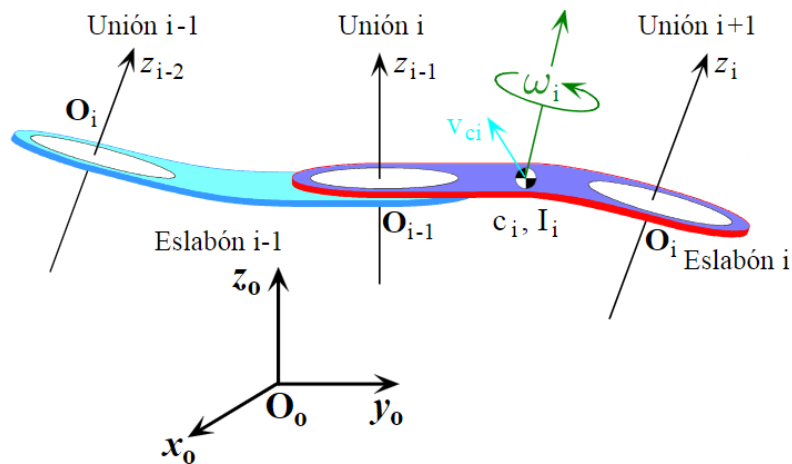


Figura 14 Diagrama de un Robot de n grados de libertad

La formulación Lagrangiana para un robot de n grados de libertad está determinado por la ecuación:

$$\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{U} \quad (2.5)$$

Considerando el robot manipulador de la Figura 14, se tiene que la energía total \mathcal{E} es la suma de sus energías cinéticas y potencial, es decir:

$$\mathcal{E}(q(t), \dot{q}(t)) = \mathcal{K}(q(t), \dot{q}(t)) + \mathcal{U}(q(t), \dot{q}(t))$$

Donde $q(t) = [q_1(t), \dots, q_n(t)]^T$

El Lagrangiano $\mathcal{L}(q, \dot{q})$ de un robot de n grados de libertad es la diferencia entre su energía cinética y energía potencial:

$$\mathcal{L}(q(t), \dot{q}(t)) = \mathcal{K}(q(t), \dot{q}(t)) - \mathcal{U}(q(t), \dot{q}(t)) \quad (2.6)$$

Donde \mathcal{U} representa a las fuerzas conservativas como la gravedad y/o resortes.

Se tiene entonces que las ecuaciones de movimiento de Lagrange para un manipulador de n grados de libertad están dadas por la ecuación:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2.7)$$

Se observa que se tendrán tantas ecuaciones escalares dinámicas como g.d.l. tenga el robot. Por tanto para hallar el modelo dinámico de un manipulador se tiene 4 pasos los cuales son:

- Cálculo de la energía cinética: $\mathcal{K}(q(t), \dot{q}(t))$
- Cálculo de la energía potencial: $\mathcal{U}(q(t), \dot{q}(t))$
- Aplicar Lagrangiano (2. 6): $\mathcal{L}(q(t), \dot{q}(t))$
- Desarrollar las ecuaciones de Lagrange (2. 7)

2.4 Celda Flexible de Trabajo o Manufactura

Una celda de trabajo o celda flexible de manufactura, es un grupo de máquinas relacionadas que realizan un proceso en particular, o una estación de un proceso de manufactura aún más largo. Ver Figura 15. El término o aspecto flexible nos indica que la celda no está restringida a una sola tarea o parte del proceso, sino que todo lo contrario puede acomodarse fácilmente a distintas partes y productos.

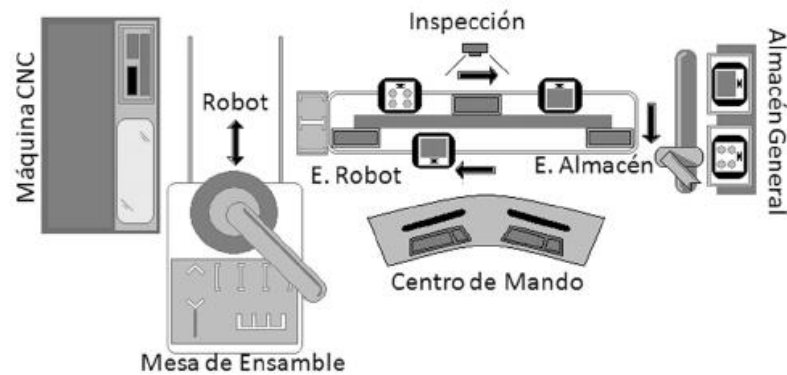


Figura 15 Esquema Celda Flexible Manufactura

Fuente: (Gamboa & Ramirez, 2008)

Las principales aplicaciones de una celda flexible son: (Sena, 2007)

- **Mecanizado:** 30% reducción de tiempos muertos, y aumento de utilización de máquinas ente 55% a 85%.
- **Utilización de Robots:** Según (Sena, 2007), 100% aumento en la producción, y notable reducción de tiempos de producción aproximadamente de 75%.

Al momento de implementar una celda flexible de manufactura se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- *Área de Trabajo directo:* son las máquinas que funcionarán sin un operador.
- *Área de Trabajo indirecto:* Inspección, manejo y envíos.
- *Área de máquinas:* herramientas, lubricantes, etc.
- *Área de manejo de materiales:* programación de trabajos, traslado de partes.

De igual manera para que una celda de trabajo sea lo más óptima posible, el sistema de control debe tener las siguientes características:

- Monitoreo de todos los equipos
- Monitoreo del sistema de alarmas
- Administración
- Control de toda la producción

A medida que las industrias van creciendo, competencia entre ellas actualmente es muy elevada y debido a esto han abierto campo para las celdas flexibles de manufactura, las cuales cada vez dan soluciones más prácticas, y en consecuencia de esto se estima que las celdas flexibles serán la solución más óptima para los distintos problemas a nivel industrial.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, el uso de los robots en las celdas flexibles se ha intensificado de una manera impresionante, a tal punto que hoy en día se puede decir que una verdadera celda flexible de manufactura debe tener incorporado un robot industrial, los cuales poco a poco pueden cumplir tareas de una máquina CNC, realizando dicha tarea de mejor manera, y entonces al incluir un robot industrial estaríamos en presencia de la denominada “celda robotizada”. Ver Figura 16.



Figura 16 Célula de Placa Refinadora totalmente Automática con Gaging y C.G.

Fuente: (BTI, 2017)

Para un proyecto de implementación de una celda robotizada se debe tener en consideración cierto factores, que van desde el posible rediseño del producto, hasta la definición detallada del lay-out del sistema. De igual manera la selección adecuada del robot que cumpla de forma eficiente

la tarea a realizar, y podría requerirse diseñar otros elementos (mesas, alimentadores, manipuladores, maquinas CNC, etc.) que intervienen en la celda y poder ubicarlos fácilmente en el sistema. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

2.4.1 Tipos de Celdas Flexibles de Manufactura

2.4.1.1 Celdas Atendidas

Este tipo de celdas son aquellas en las que un operario puede trasladar material manualmente (Ver Figura 17), esto es siempre y cuando el material no sea pesado y nocivo para el operador.



Figura 17 Celda Atendida

Fuente: (Gamba, 2016)

2.4.1.2 Celdas No Atendidas

En este tipo de celdas, únicamente el robot industrial es el que manipula los materiales (Ver Figura 18), de tal manera que los operadores no realizan trabajos pesados.

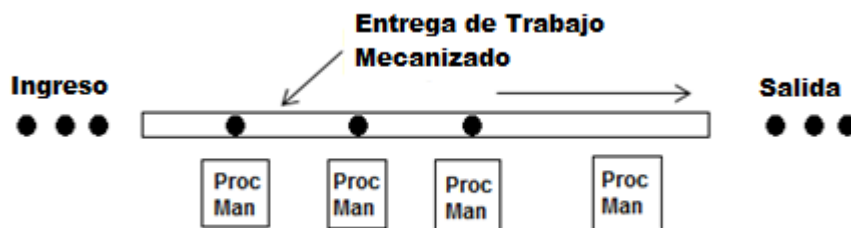


Figura 18 Celda No Atendida
Fuente: (Huegro, 2016)

2.4.1.3 De acuerdo a su disposición

- Línea
- En U
- En “loop” (bucle)

En la Figura 19 se puede observar el esquema de cada una de las configuraciones mencionadas.



(a)

CONTINÚA →

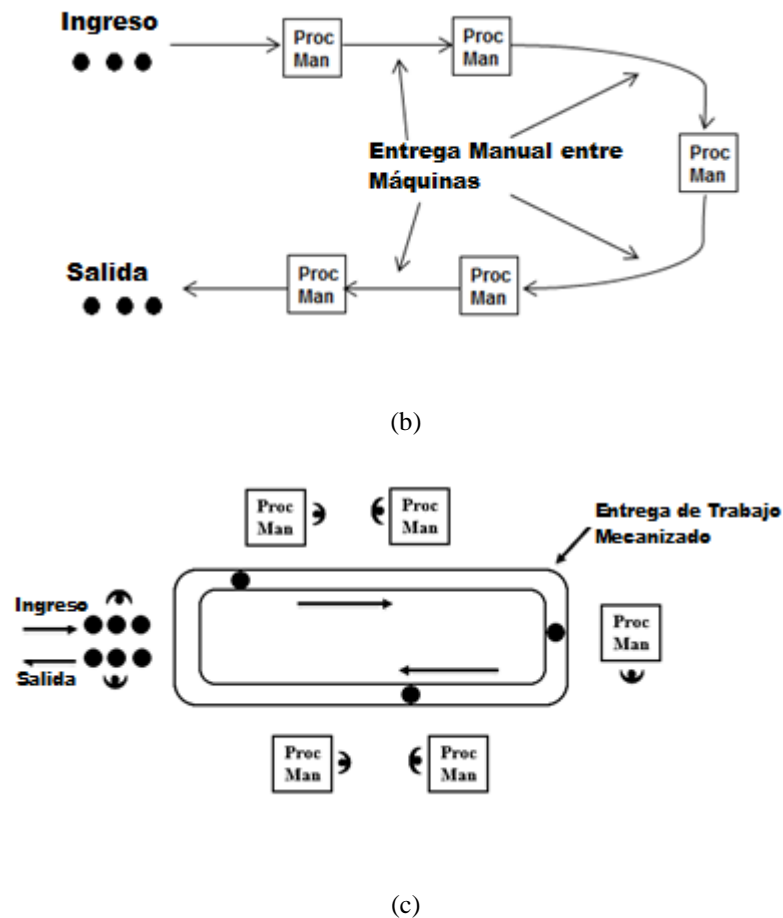


Figura 19 Tipos de Celdas según su disposición; (a) Línea, (b) En U, (c) Loop
Fuente: (Groover, 2010)

2.4.2 Etapas para el diseño de celdas de manufactura

(Perez Montes de Oca, 2008)

Las etapas de diseño de celdas de manufactura son:

1. Elaborar esquema del Proceso
2. Elaborar Diagrama de Operaciones
3. Elaborar matriz de familias de productos
4. Elaborar mapeo de procesos antes de la implementación de celdas de manufactura
5. Realizar el cálculo de la capacidad de producción antes de la implementación de celdas de manufactura.

6. Elaborar el bosquejo de celdas de manufactura
7. Elaborar el mapeo de proceso futuro para la implementación de celdas de manufactura
8. Realizar el cálculo de la capacidad de producción futura para la implementación de celdas de manufactura
9. Elaborar el diagrama de bloques del proceso antes de la implementación de la celda de manufactura
10. Elaborar el diagrama de bloques del proceso futuro de la implementación de la celda de manufactura
11. Requerimientos para Lay-out futuro
12. Dibujar Lay-out de la fábrica o área antes de la implementación de la celda de manufactura.
13. Dibujar Lay-out de futuro la fábrica o área de la celda de manufactura.
14. Implementar la celda de manufactura según Lay-out
 - Comparar la producción antes de la celda vs la producción después de la implementación de la celda

2.4.3 Disposición de un Robot Industrial en una celda de trabajo

En una celda de manufactura automatizada la disposición de un robot industrial es uno de los aspectos más relevantes, depende exclusivamente de los requerimientos del proceso que éste vaya a realizar. Tenemos las siguientes disposiciones:

- Centro de la Celda
 - Aprovechamiento al máximo del campo de acción del robot.
 - Principalmente SCARA, Polares y Cilíndricos
 - Para: Carga, Descarga, soldadura, paletizado, ensamblado

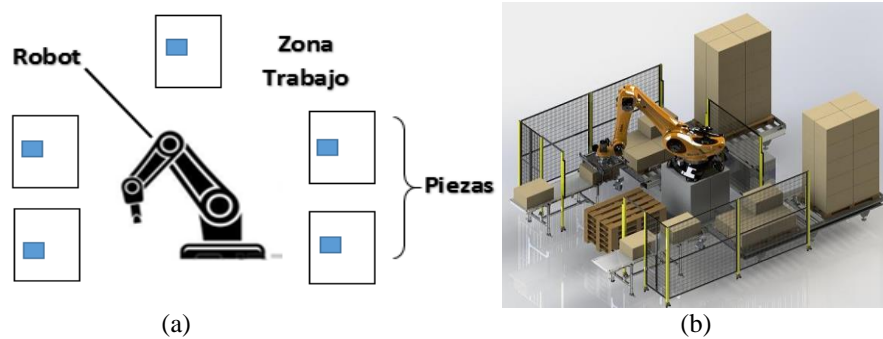


Figura 20 (a) Esquema Robot centro de celda, (b) Aplicación Paletizado
Fuente: (b) (Ingeniería, 2017)

- En línea
 - Líneas de transporte
 - Transporte continuo o intermitente
 - Soldadura automotriz

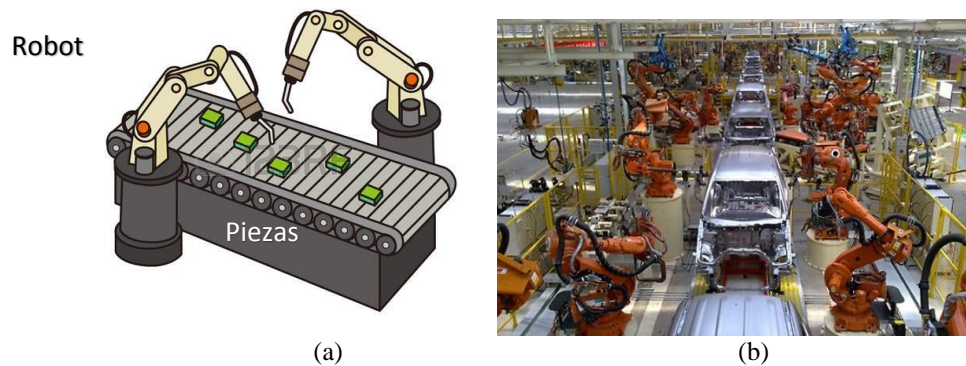


Figura 21 (a) Esquema robot en línea, (b) aplicación, soldadura automotriz
Fuente: (KUKA, 2017)

- Robot Móvil
 - Desplazamiento del robot sobre una vía
 - Trabajo sobre piezas en movimiento, carga y descarga de máquinas

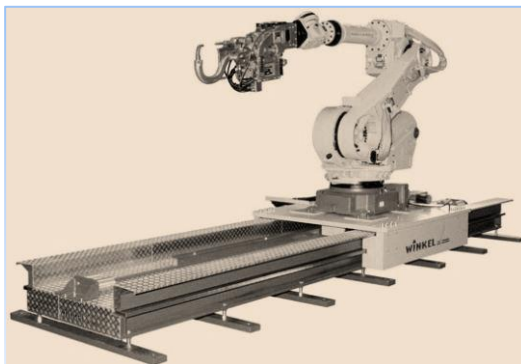


Figura 22 Robot Móvil

Fuente: (Culqui, 2015)

- Robot Suspendido
- Intrínseca de robots tipo pórtico, también en articulares
- Mejor aprovechamiento del área de trabajo
- Proyección de material, aplicación de adhesivos, corte, soldadura por arco.

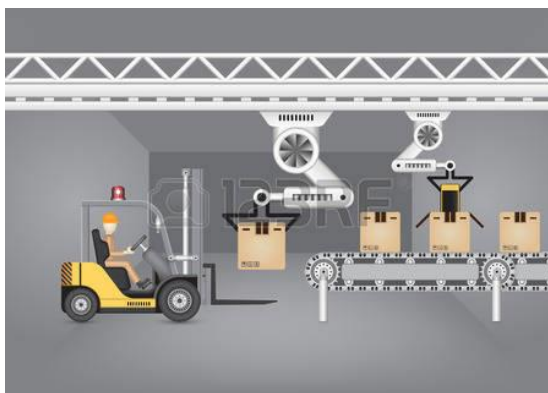


Figura 23 Robot suspendido

Fuente: (AytecAutomation, 2017)

2.4.4 Criterios de Implementación de un robot industrial en una celda

Para la implementación de un robot en una celda de trabajo se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: (Groover, 2010)

- Disposición del Robot en la celda
- Volumen de trabajo

- Grados de Libertad
- Precisión
- Repetibilidad (0,1 a 0,05 mm)
- Resolución
- Velocidad (inversamente proporcional a la carga)
- Capacidad de Carga
- Sistema de control (CP, PTP)

Con estas características propias de cada modelo de MRI y determinando la tarea que se desea realizar, podremos determinar con mayor exactitud las características deseadas para cada aplicación. En la Tabla 3 tenemos algunos ejemplos para cada aplicación.

Tabla 3

Características requeridas de acuerdo a la aplicación

PINTURA	PALETIZADO
<ul style="list-style-type: none"> • Programación por guiado • Campo acción similar al humano • Estructura Antropomórfica • 6 GDL 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada capacidad de carga • Relación alta entre área de trabajo y tamaño del robot • Control PTP
PROCESADO	ENSAMBLADO
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de programación • 5-6 GDL • Campo acción similar al humano • Control trayectoria continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada precisión y rapidez • Campo acción similar al humano • Potencia del sistema de programación • Sistema Sensorial

Fuente: (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 1997)

2.5 Sistemas de Visión Artificial en la Industria

A nivel industrial los sistemas de visión artificial se encargan de integrar imágenes digitales captadas, dispositivos de entrada y salida y redes de computadores, ya sea para inspección o control de productos fabricados mediante equipos especializados tales como brazos robóticos.

Actualmente se ha logrado implementar técnicas y modelos matemáticos de visión artificial, de tal manera que permitan a los robots obtener mejores resultados al adquirir información, como por ejemplo identificación de patrones, identificación de colores, determinar profundidades, etc. En los últimos años, los sistemas de visión artificial han ido creciendo tanto en tecnología como en la propia filosofía del sistema de visión. Debido a esto se ha dado cambios relevantes en la forma de interpretar la visión como una herramienta standard para el análisis de procesos. De los cuales se tiene los siguientes:

- Inspección continua
- Inspección del 100% de los productos
- Criterios constantes
- Tiempo real
- Análisis de errores
- Errores de aspecto, color, dimensiones, etc.

Las industrias que más utilizan un sistema de visión artificial son: Automoción, Alimenticia, Sector Farmacéutico, Electrónica, Robótica, Seguridad/ Vigilancia, Envase y embalaje entre otras.

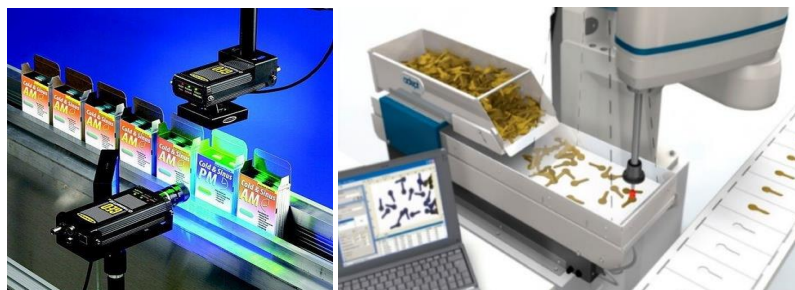


Figura 24 Aplicaciones Visión Artificial en la Industria

Fuente: (Industry, 2017)

2.5.1 Componentes de un Sistema de Visión

En la Figura 25 se pueden ver los componentes de un sistema de visión artificial.

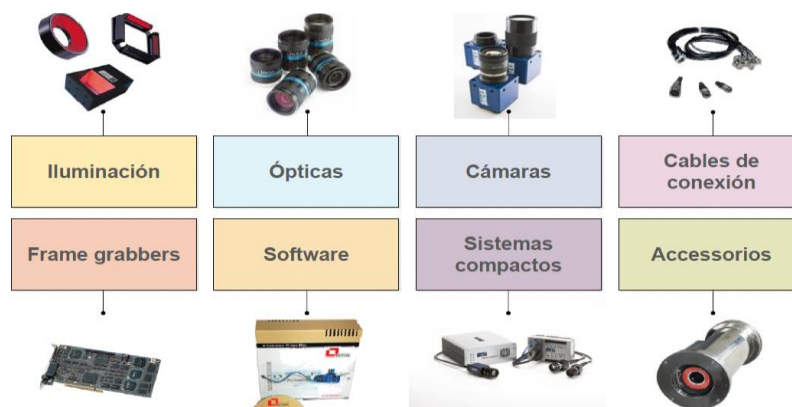


Figura 25 Componentes de un Sistema de Visión
Fuente: (INFAIMON, Vision Artificial Aplicada a la Industria, 2011)

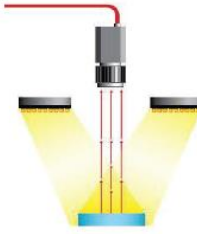

2.5.2 Elementos de la Visión Artificial

2.5.2.1 Iluminación o Fuente de Luz

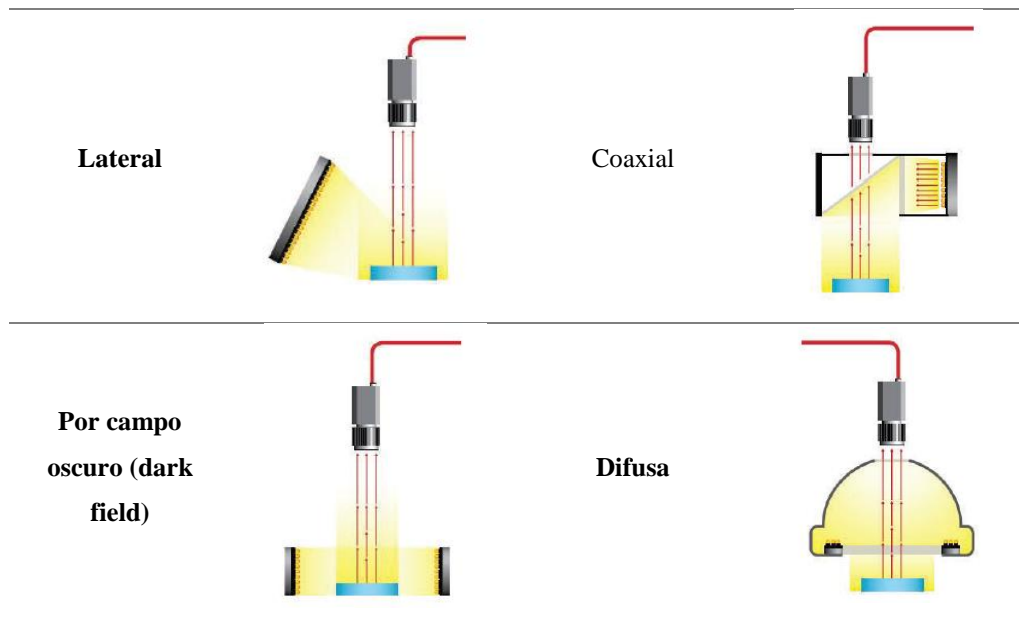
Es el aspecto más importante, ya que de éste depende la calidad, nitidez de la imagen que se desee capturar, debe ser independiente del entorno donde se encuentre el objeto, de manera que se pueda variar la forma en la que la cámara mira al objeto. Se tiene algunos tipos de iluminación las cuales se dan a conocer en la Tabla 4: (INFAIMON, Iluminación, 2017)

Tabla 4

Tipos iluminación en visión artificial

Tipo	Esquema	Tipo	Esquema
Directa		Por contraste o contra luz	

CONTINÚA →



Fuente: (INFAIMON, Vision Artificial Aplicada a la Industria, 2011)

Los elementos restantes de un sistema de visión son:

- Sensores
- Computador

2.5.3 Procesamiento de Imágenes

El análisis de imágenes abarca varias sub-etapas, los cuales podemos observar en la Figura 26. (Carvajal & Martínez, 2016)

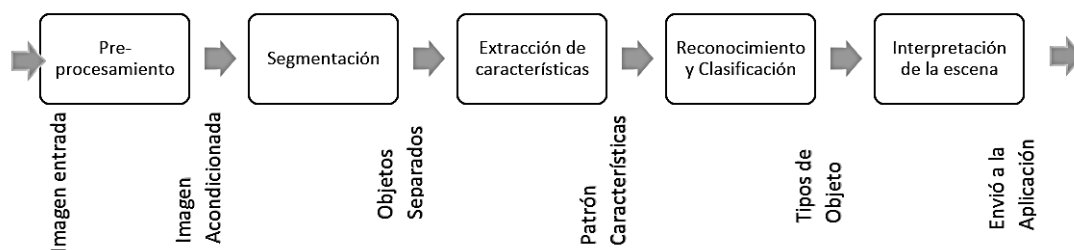


Figura 26 Procesamiento y Análisis de Imágenes

De acuerdo con el proceso descrito, según (Porrás & De la Cruz, 2015), cada área se describe como:

- Captación: proceso de adquirir una imagen.
- Pre procesamiento: Métodos para reducir las características que no se requieren de una imagen como el ruido. En esta etapa se aplican técnicas que permitan el realce o mejoramiento de algunas características importante de las imágenes, las cuales facilitaran el proceso de segmentación.
- Segmentación: Divide una imagen en objetos que serán de nuestro interés, la técnica más utilizada es la umbralización, la cual permite separar dos o más regiones de una imagen a partir de un análisis de histograma.
- Descripción: Se refiere a tomar características principales de un objeto como son su forma, tamaño, color, etc. Esto para poder diferenciarlo de otros objetos.
- Reconocimiento: Proceso de identificación de un objeto en un entorno.
- Interpretación: Dar un significado.

2.6 Robótica Colaborativa-Cooperativa

Los robots colaborativos son segmentos virtuales o mecánicos, estos se caracterizan principalmente por llevar un sistema de seguridad, el cual les permite detenerse al captar a un operador, y trabajar junto a él. Al implementar dicha configuración se busca que los robots interactúen entre ellos, pero cada uno tendrá su movimiento independientemente del otro, los sensores son parte esencial para el funcionamiento adecuado del sistema.



Figura 27 Trabajo Colaborativo entre robots
Fuente: (KUKA, 2017)

En la industria al implementar células robotizadas se puede lograr la coordinación y la cooperación de múltiples robots para realizar las mismas tareas u operación. Una gran cantidad de células robotizadas se crean especialmente para la soldadura por puntos para los chasis de autos, soldadura de arco, montaje, etc. El manejo de múltiples robots con el mismo objeto se considera como las células multi-robotizadas más recientes y de rápida evolución. (Koukolová & Swic, 2014).

Los robots cooperativos, es decir, los robots que se comunican entre sí para llevar a cabo tareas comunes, pueden utilizarse para reducir el número de dispositivos necesarios, así como para acortar el tiempo del ciclo de proceso. Su control se basa ya sea en el uso de controladores individuales, que son capaces de realizar operaciones multitarea y control de múltiples robots o en el uso de marcos especiales, lo que permite a los controladores estándar para cooperar entre sí, mediante el intercambio de datos de movimiento, así como la sincronización y señales de seguridad.

Las aplicaciones de los robots cooperativos comprenden características tales como: compartir espacio de trabajo, sincronización de movimiento, que es la capacidad de permitir que varias máquinas en una celda comiencen y completen un comando de movimiento simultáneamente. (Makris, Michalos, Eytan, & Chryssolouris, 2012)

2.6.1 Componentes de una celda de ensamble con robots cooperativos

Los sistemas de robots cooperativos para aplicaciones industriales han sido introducidos recientemente en el mercado robótico. Para aplicaciones industriales, los movimientos cooperativos son un desafío importante para aumentar la flexibilidad (Schmitt, 2010). Una celda robotizada compuesta por robots cooperativos es básicamente la misma con respecto a componentes de una celda de trabajo convencional; en una celda de ensamblaje industrial con un solo manipulador robótico hay un panel de control y normalmente un HMI (Human Machine Interface) para mostrar las interfaces de software del robot para programación y configuración.

La principal diferencia entre una celda de trabajo clásica con una celda robótica cooperativa es la introducción de una red de comunicación entre los controladores de todos los robots existentes en la celda (KUKA, 2017). La red mencionada en tiempo real para intercambiar datos y señales, es necesaria para realizar tareas cooperativas. Otra diferencia es usar sólo un HMI para todos los robots de la célula robótica. La Figura 28 muestra la conexión de red entre dos robots cooperativos que comparten la misma HMI para una determinada tarea.

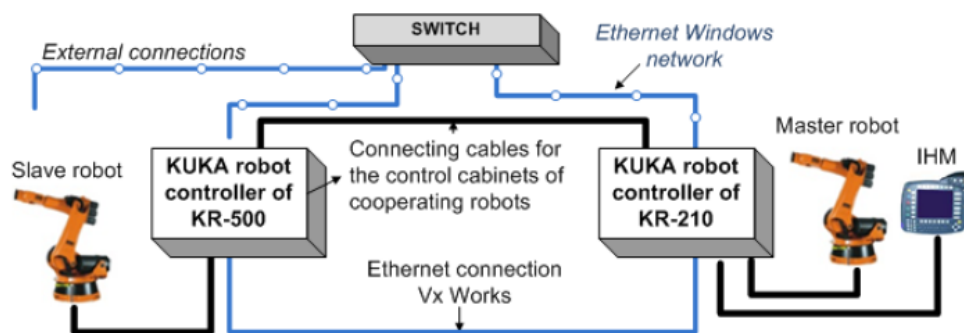


Figura 28 Red de conexiones entre dos robots cooperativos

Fuente: (Santos & Gonzaga Trabasso, 2012)

2.6.2 Arquitectura de los robots colaborativos

La arquitectura de los robots colaborativos en una celda flexibles consta de tres partes principales, éstas serán las responsables del correcto funcionamiento de una celda flexible que consta de robots colaborativos: (Makris, Michalos, Eytan, & Chryssolouris, 2012)

- Herramientas Reconfigurables.

Permiten 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

Permiten 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 módulo de control utiliza un enfoque basado en sensores para potenciar un 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 29, 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.

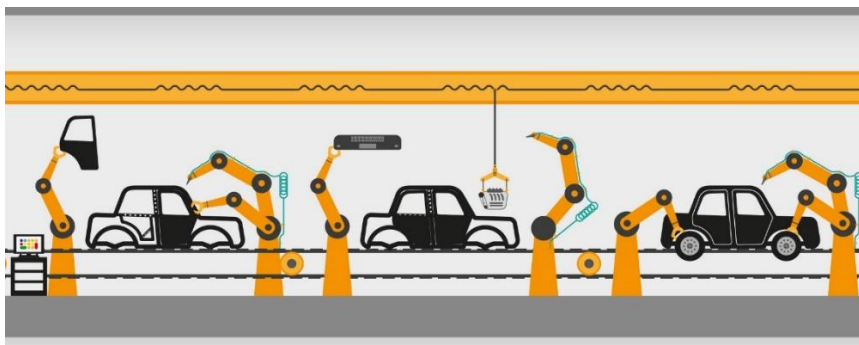


Figura 29 Celda Flexible Robotizada Colaborativa

Fuente: (AytecAutomation, 2017)

2.6.3 Implementación de una celda flexible con robots colaborativos

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. Planeación
 - 1.1 Definir número de robots
 - 1.2 Definir carga de cada robot
 - 1.3 Definir robot principal
2. Inicio de la celda
 - 2.1 Conectar cables de red
 - 2.2 Configurar cada robot
3. Configuración de la celda
 - 3.1 Configurar la celda robótica dentro de la interfaz del software del robot
 - 3.2 Configurar la posición de los robots respecto a otros
 - 3.3 Calibrar herramientas
4. Programación de la celda
 - 4.1 Programación de los robots

Resumen

El robot SCARA es un manipulador que consta de 3 grados de libertad desarrollado en Japón en 1979, se lo conoce por sus movimientos rápidos y precisos. El robot SCARA posee un amplio campo de aplicación industrial, sobre todo en aquellas aplicaciones que se realizan en un plano. El estudio cinemático permite determinar las variables articulares de un manipulador para el posicionamiento del mismo en el espacio. El estudio dinámico permite conocer fuerzas, aceleraciones a las que estará sometidas un robot, y para su construcción nos ayuda a la selección adecuada de los actuadores del robot.

Un sistema de visión artificial nos permite conocer el entorno de trabajo en este caso de un manipulador, a medida que la tecnología avanza la visión artificial a tomado un gran campo de aplicación dentro de la industria. Los elementos principales de un sistema de visión artificial son: iluminación, cámara, software. Para el procesamiento de imágenes en un sistema de visión artificial se tiene las etapas de: captura, pre-proceso, segmentación, extracción de características, reconocimiento e interpretación.

En la industria al implementar células robotizadas se puede lograr la coordinación y la cooperación de múltiples robots para realizar las mismas tareas u operación dicha coordinación se la conoce como “trabajo colaborativo”. La principal diferencia entre una celda de trabajo clásica con una celda robótica cooperativa es la introducción de una red de comunicación entre los controladores de todos los robots existentes en la celda. Una celda robotizada colaborativa consta de tres partes: herramientas configurables, sistema inteligente de control-supervisión e integración y comunicación.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y DISEÑO MECATRÓNICO

En el capítulo se detalla el proceso de diseño de una celda robotizada mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA. Inicia con el planteamiento de la matriz de calidad en la cual se determinan las principales necesidades del usuario y sus requerimientos técnicos. Posteriormente se determinan los subsistemas a desarrollar de todo el proyecto, para cada subsistema se van planteando alternativas para el diseño de cada elemento, se analiza ventajas y desventajas de tal manera que al final se seleccione la mejor alternativa. Una vez seleccionada la mejor alternativa se procede al diseño a detalle, es decir, se realizan los cálculos y dimensionamientos de cada componente que formarán parte de la celda robotizada.

3.1 Matriz de Calidad

En la matriz de calidad se detallan, analizan todas las necesidades y requerimientos del usuario para posteriormente definir las especificaciones funcionales, técnicas del sistema, dando prioridad a cada uno de ellos para finalmente establecer los módulos y subsistemas del proyecto.

3.1.1 Definición de necesidades

En la primera parte de la matriz, se detallan características establecidas por el usuario, las cuales determinarán las especificaciones funcionales que debe tener el producto, es decir, definen características y conceptos que se requieren para el diseño final. En la Tabla 5 se establecen las necesidades del proyecto a desarrollar.

Tabla 5
Necesidades del usuario

N°	Necesidad
1	Fácil uso.
2	Fácil mantenimiento.
3	Movimiento sincronizado entre robots.
4	El movimiento de la banda debe ser constante.
5	Fácil interacción con el usuario.
6	Clasificación de piezas por su forma y color
7	Debe ser resistente a impactos, humedad, corrosión, etc.
8	Mayor longitud de trabajo en la banda transportadora
9	El sistema puede utilizarlo cualquier persona.
10	Alta velocidad de Clasificación

3.1.2 Definición de características técnicas

Se refiere a características de ingeniería del producto o proyecto, en el cual se reflejan todas las necesidades previamente establecidas. En la Tabla 6 se detallan las especificaciones a partir de las necesidades establecidas.

Tabla 6
Especificaciones técnicas del proyecto

N°	Requerimiento
1	Operación Simple
2	Arquitectura Modular
3	Control de velocidad de banda
4	Software Libre
5	Interfaz HMI Comprensible
6	Sistema robusto
7	Alimentación de piezas continua
8	Robot SCARA de alta velocidad
9	Trabajo colaborativo entres 2 robots
10	Sistema Visión Artificial

3.1.3 Despliegue de la Función de Calidad QFD

La función de desarrollo de calidad (QFD), es un proceso en el cual los requerimientos y necesidades del cliente sean traducidos en características técnicas. Estas características son manejadas por una industria mediante la función del diseño, mediante un equipo multidisciplinario en el cual se incluye ventas, marketing, ingeniería de diseño, ingeniería de manufactura, etc. El principal objetivo es centrar el producto o proyecto en la satisfacción de los requerimientos del cliente.

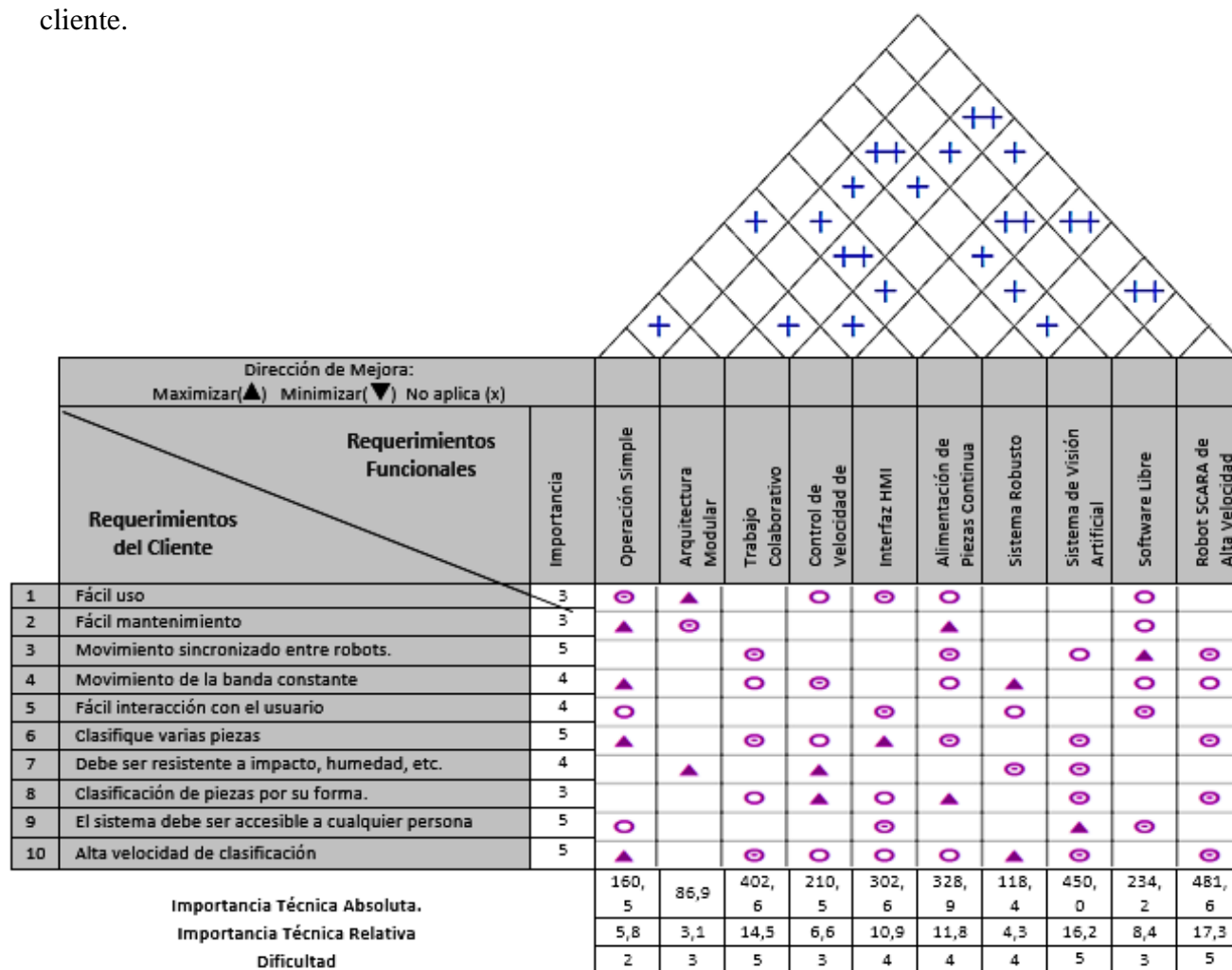


Figura 30 Matriz QFD del proyecto

En las Tabla 7 y Tabla 8 se detalla el significado de cada símbolo utilizado en la matriz QFD del proyecto.

Tabla 7
Escala de relaciones entre requerimientos

Símbolo	Descripción	Valor
⊖	Relación Fuerte	9
○	Relación Moderada	3
▲	Relación Débil	1
	Ninguna	0

Tabla 8
Escala de correlaciones

Símbolo	Descripción
++	Correlación Positiva Fuerte
+	Correlación Positiva
—	Correlación Negativa

En la Figura 30 se muestra la matriz QFD, del proyecto a desarrollar teniendo en cuenta las necesidades y su relación con las características técnicas definidas anteriormente, posteriormente se analiza la puntuación obtenida de cada una de las características técnicas de tal manera que se ordenan de mayor a menor, dicha puntuación se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9
Resultados matriz QFD

#	Características técnicas	Puntuación	Porcentaje (%)
1	Operación Simple	160,5	5,8
2	Arquitectura Modular	86,9	3,1
3	Control de velocidad de banda	210,5	6,6
4	Software Libre	234,2	8,4
5	Interfaz HMI Comprensible	302,6	10,9
6	Sistema robusto	118,4	4,3
7	Alimentación de piezas continua	328,9	11,8
8	Robot SCARA de alta velocidad	481,6	17,3
9	Trabajo colaborativo entres 2 robots	402,6	14,5
10	Sistema Visión Artificial	450	16,2

3.2 Factibilidad y Planeación

La factibilidad del proyecto resulta directamente del análisis de todas las características técnicas y del desempeño de las mismas. Una vez analizadas, en la Tabla 9 son clasificadas en módulos los cuales se dividen en subsistemas de tal manera que se obtiene una estructura funcional, la cual cubre cada una de las necesidades establecidas anteriormente. En la Tabla 10 se detallan los subsistemas para el desarrollo del proyecto.

Tabla 10
Módulos y Subsistemas del proyecto

#	Módulos	Subsistema	Función	Hitos
1	Robot SCARA Alta Velocidad	Geometría Robot	Geometría y diseño del robot SCARA	8
		Cinemática y Dinámica del Robot	Movimiento y posicionamiento del Robot	8
2	Celda de Trabajo Colaborativo	Diseño y Construcción Banda Transportadora	Mayor área de trabajo para piezas a clasificar	1,2,3,6
		Tarjeta Control	Control Movimiento de Robots	8,9
3	Control	Visión Artificial	Detectar objetos, color y forma	7,9,10
		Filtro de Kalman	Predicción de posición de piezas	7,9
		Trabajo Colaborativo entre robots	Trabajo sincronizado de robots, evitando colisiones entre ellos	9
4	HMI	Interfaz Gráfica	Interacción con operario	4,5

En el proceso genérico de desarrollo de productos (Ulrich & Eppinger, 2013), se establece una secuencia en la cual se tiene 3 etapas importantes:

- Desarrollo del Concepto: Establecer necesidades del cliente, desarrollar conceptos, estimar costos de manufactura.
- Diseño en el nivel sistema: Desarrollar plan para opciones de producto, generar arquitecturas, definir subsistemas, realizar una ingeniería preliminar de componentes.
- Diseño de detalle: Definir geometrías de piezas y componentes, seleccionar materiales, asignar tolerancias.

3.3 Módulo 1. Robot SCARA

3.3.1 Subsistema 1. Cinemática y Dinámica

En el estudio cinemático se determinará la cinemática inversa en la que se obtienen las ecuaciones que determinan el posicionamiento del efector final de robot. En el estudio dinámico del robot se definen las ecuaciones dinámicas, las cuales determinaran las fuerzas y pares a los que estará sometido el robot al momento de realizar su posicionamiento.

3.3.1.1 Cinemática

Debido a que el robot SCARA a construir será de las mismas características (forma, dimensiones) al existente, se tiene que el estudio cinemático es el mismo propuesto por (Montufar & Salazar, 2017) .

En la Figura 31 se tiene el esquema de un robot SCARA, en el cual se definen todos los parámetros que se utilizarán para determinar las relaciones que definen el posicionamiento en el espacio (x,y,z) , en función de las variables articulares del robot.

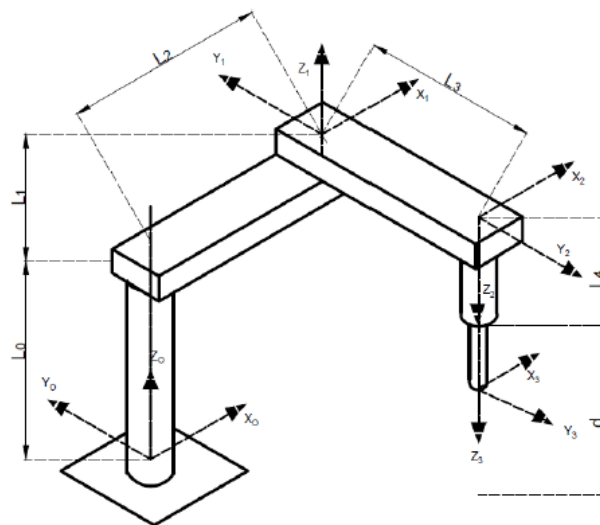


Figura 31 Esquema robot SCARA, parámetros Denavit Hartenberg
Fuente: (Montufar & Salazar, 2017)

Los valores de las variables L_0, L_1, L_2, L_3 y L_4 son:

$$L_2 = 200 \text{ mm}$$

$$L_3 = 190 \text{ mm}$$

$$L_4 = 279.5 \text{ mm}$$

$$L_1 + L_0 = 449.25 \text{ mm}$$

Tabla 11
Parámetros D-H Robot SCARA

Articulación	q_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	$L_0 + L_1$	L_2	0
2	q_2	0	L_3	180
3	0	$L_4 + d$	0	0

Con los parámetros DH definidos en la Tabla 11, se calculan las matrices de transformación A.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(q_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(q_i) & \sin(\alpha_i)\sin(q_i) & a_i \cos(q_i) \\ \sin(q_i) & \cos(\alpha_i)\cos(q_i) & -\sin(\alpha_i)\sin(q_i) & a_i \sin(q_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

En función de la ecuación (3.1) se obtiene las matrices de transformación ${}^0A_1, {}^1A_2$ y 2A_3 :

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & L_2 \cos(q_1) \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & L_2 \sin(q_1) \\ 0 & 0 & 1 & L_0 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & \sin(q_2) & 0 & L_3 \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & -\cos(q_2) & 0 & L_3 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_4 + d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con las matrices anteriores se obtiene la matriz de transformación de movimiento homogénea final:

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \quad (3.2)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 & L_2 \cos(q_1) + L_3 \cos(q_1 + q_2) \\ \sin(q_1 + q_2) & -\cos(q_1 + q_2) & 0 & L_2 \sin(q_1) + L_3 \sin(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & (L_0 + L_1) - (L_4 + d) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las coordenadas x, y, z se definen como:

$$x = L_2 \cos(q_1) + L_3 \cos(q_1 + q_2) \quad (3.3)$$

$$y = L_2 \sin(q_1) + L_3 \sin(q_1 + q_2) \quad (3.4)$$

$$z = (L_1 + L_0) - (L_4 + d) \quad (3.5)$$

Para determinar los valores de las variables articulares del robot $[q_1, q_2, d_1]$, se utilizan métodos geométricos en base a la Figura 32.

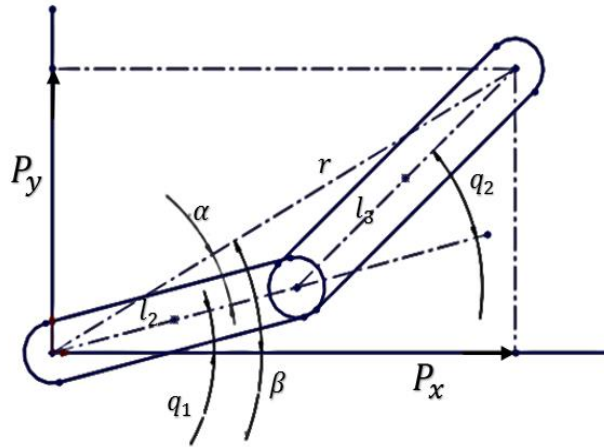


Figura 32 Esquema para determinar Variables Articulares del Robot

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Py}{Px}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + Px^2 + Py^2 - L_3^2}{2L_2\sqrt{Px^2 + Py^2}}\right) \quad (3.6)$$

$$q_2 = \cos^{-1}\left(\frac{Px^2 + Py^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}\right) \quad (3.7)$$

$$d = (L_1 + L_0) - (L_4 + Pz) \quad (3.8)$$

Sustituyendo los valores de las longitudes se tiene las ecuaciones cinemáticas que representan a las variables articulares del robot en función del punto de coordenadas P_x , P_y , P_z .

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Py}{Px}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{Px^2 + Py^2 - 7900}{400\sqrt{Px^2 + Py^2}}\right)$$

$$q_2 = \cos^{-1}\left(\frac{Px^2 + Py^2 - 76100}{76000}\right)$$

$$d = 169.75 - Pz$$

3.3.1.2 Dinámica

El modelo dinámico se realizará utilizando la formulación de Euler-LaGrange, la cual permite determinar la dinámica del robot mediante un balance de energías. Dichas ecuaciones tendrán en cuenta únicamente la energía cinética y potencial almacenada en el sistema.

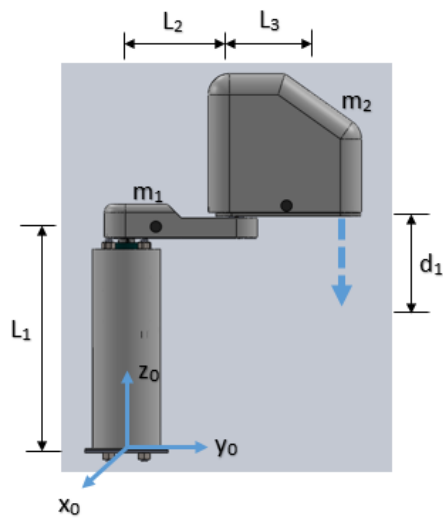


Figura 33 Robot SCARA

Los parámetros de Denavit-Hartenberg para los ejes de rotación y el efector final que se muestran en la Tabla 11:

Se sustituye lo siguiente:

$$L_4 + d = q_3$$

Los parámetros de Denavit-Hartenberg con referencia a los centros de masa (cm) son: Ver Tabla 12.

Tabla 12

Parámetros D-H centros de masa

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1 cm	q_1	h_1	l_{11}	0
2 cm	q_2	0	l_{22}	180
3 cm	0	q_3	0	0

Transformaciones Homogéneas

Previamente en el desarrollo de la cinemática se encontraron las matrices de transformación.

Usando la regla de concatenación de transformaciones entre marcos móviles, obtenemos las matrices de transformación de cada articulación con respecto a la base del sistema.

$$T_2^0 = T_1^0 \times T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & -\cos(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & -1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$T_3^0 = T_2^0 \times T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & -\cos(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & -1 & h_1 - q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Transformaciones de los Centros de masa.

Siguiendo los mismos criterios, calculamos las matrices de transformación homogénea de cada centro de masa con respecto a la base del sistema.

$$T_{101} = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & l_{11} \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & l_{11} \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{211} = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_1 & 0 & l_{21} \cos q_2 \\ \sin q_2 & -\cos q_1 & 0 & l_{21} \sin q_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{321} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
T_{201} &= T_{10} \times T_{211} \\
&= \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 & l_{21} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & -\cos(q_1 + q_2) & 0 & l_{21} \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & -1 & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{30} &= T_{20} \times T_{321} \\
&= \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & -\cos(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & -1 & h_1 - h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)
\end{aligned}$$

Cálculos de Jacobianos para los centros de masa.

Un Jacobiano se define mediante la siguiente ecuación.

$$\dot{X} = J(q) \times \dot{q}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_v(q) \\ J_\omega(q) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Para poder calcular el Jacobiano de cada centro de masa del robot debemos definir las siguientes variables:

Ejes de movimiento de cada centro de masa

$$Z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, Z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, Z_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Posicione de cada centro de masa respecto a la base O_0

$$O_{11} = \begin{bmatrix} l_{11} \cos q_1 \\ l_{11} \sin q_1 \\ h_1 \end{bmatrix}$$

$$O_{21} = \begin{bmatrix} l_{21} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ l_{21} \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ h_1 \end{bmatrix}$$

$$O_{31} = \begin{bmatrix} l_{21} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ l_{21} \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ h_1 - q_3 \end{bmatrix}$$

Centro de giro del eslabón 2

$$O_1 = \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 \\ l_1 \sin q_1 \\ h_1 \end{bmatrix}$$

Jacobiano para el centro de masa 1

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{i1} \\ J_{i2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Como la primera articulación es de tipo revoluta, tenemos la siguiente expresión para los Jacobianos.

$$J_{11} = \begin{bmatrix} Z_0 \times (O_{11} - O_0) & 0 & 0 \\ \text{Revoluta} & \text{No afecta} & \text{No afecta} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$J_{12} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ \text{Revoluta} & \text{No afecta} & \text{No afecta} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Por tanto se tiene:

$$J_{11} = \begin{bmatrix} -l_{11} \sin q_1 & 0 & 0 \\ l_{11} \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Jacobiano para el centro de masa 2.

Para la segunda articulación se realiza el mismo procedimiento anterior.

$$J_2 = \begin{bmatrix} J_{21} \\ J_{22} \end{bmatrix}$$

Por tanto se tiene:

$$J_{21} = \begin{bmatrix} -l_{21} \sin(q_1 + q_2) - l_1 \sin q_1 & -l_{21} \sin(q_1 + q_2) & 0 \\ l_{21} \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 & l_{21} \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Jacobiano para el centro de masa 3.

Para la tercera articulación se realiza el mismo procedimiento teniendo en cuenta el valor correspondiente para la articulación prismática:

$$J_3 = \begin{bmatrix} J_{31} \\ J_{32} \end{bmatrix}$$

Realizando cálculos se tiene:

$$J_{31} = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(q_1 + q_2) - l_1 \sin q_1 & -l_2 \sin(q_1 + q_2) & 0 \\ l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 & l_2 \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

En resumen, los Jacobianos de los centros de masa se expresan como:

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_{11}\sin(q_1) & 0 & 0 \\ l_{11}\cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -l_{21}\sin(q_1 + q_2) - l_1\sin(q_1) & -l_{21}\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ l_{21}\sin(q_1 + q_2) + l_1\sin(q_1) & l_{21}\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -l_2\sin(q_1 + q_2) - l_1\sin(q_1) & -l_2\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ l_2\sin(q_1 + q_2) + l_1\sin(q_1) & l_2\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Matriz de Inercia $H(q)$

Para el cálculo de la matriz de inercia $H(q)$, se debe definir las matrices de los Jacobianos, las matrices de rotación y los tensores de Inercia calculados a cada centro de masa.

Jacobianos:

$$J_{11} = \begin{bmatrix} -l_{11}\sin q_1 & 0 & 0 \\ l_{11}\cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad J_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{21} = \begin{bmatrix} -l_{21}\sin(q_1 + q_2) - l_1\sin q_1 & -l_{21}\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ l_{21}\cos(q_1 + q_2) + l_1\cos q_1 & l_{21}\cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad J_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{31} = \begin{bmatrix} -l_2\sin(q_1 + q_2) - l_1\sin q_1 & -l_2\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ l_2\cos(q_1 + q_2) + l_1\cos q_1 & l_2\cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación se expresan como:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tensores de Inercia:

$$I_1 = \begin{bmatrix} I_{111} & I_{112} & I_{113} \\ I_{112} & I_{122} & I_{123} \\ I_{113} & I_{123} & I_{133} \end{bmatrix}, \quad I_2 = \begin{bmatrix} I_{211} & I_{212} & I_{213} \\ I_{212} & I_{222} & I_{223} \\ I_{213} & I_{223} & I_{233} \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} I_{311} & I_{312} & I_{313} \\ I_{312} & I_{322} & I_{323} \\ I_{313} & I_{323} & I_{333} \end{bmatrix}$$

Para calcular la matriz de inercia se debe tomar en cuenta los tipos de desplazamiento que se presentan en el centro de masa de cada eslabón, para nuestro caso se tienen en cuenta desplazamientos lineales y desplazamientos angulares. Cada uno de estos se los calcula de manera diferente y se presenta a continuación en las ecuaciones (3.21) y (3.22).

Inercias producidas por desplazamientos angulares:

$$H_{i1} = m_i J_{i1}^T J_{i1} \quad (3.21)$$

Inercias producidas por desplazamientos lineales:

$$H_{i2} = J_{i2}^T R_i I_i R_i^T J_{i2} \quad (3.22)$$

La matriz $H(q)$ se expresa mediante la ecuación (3.27):

$$H(q) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Y los términos calculados para cada elemento de la matriz de inercias $H(q)$ son:

$$h_{11} = I_{333} + I_{233} + I_{333} + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 + l_2^2 m_3 + m_1 l_{11}^2 + m_2 l_{21}^2 + 2l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + 2l_1 m_2 l_{21} \cos(q_2)$$

$$h_{22} = m_3 l_2^2 + l_1 m_3 \cos(q_2) l_2 + m_2 l_{21}^2 + l_1 m_2 \cos(q_2) l_{21} + I_{233} + I_{333}$$

$$h_{13} = 0$$

$$h_{21} = h_{12}$$

$$h_{22} = m_3 l_2^2 + m_2 l_{21}^2 + I_{233} + I_{333}$$

$$h_{23} = 0$$

$$h_{31} = h_{13}$$

$$h_{32} = h_{23}$$

$$h_{33} = m_3$$

Matriz de aceleraciones centrípetas y de Coriolis.

Para obtener la matriz debemos calcular las derivadas parciales de la matriz de inercia $H(q)$ respecto a las variables articulares de posición q .

Entonces se obtiene la matriz $C(q, \dot{q})$:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_2)(l_2 m_3 + l_{21} m_2) \dot{q}_2 & -l_1 \sin(q_2)(l_2 m_3 + l_{21} m_2) \dot{q}_1 - l_1 \sin(q_2)(l_2 m_3 + l_{21} m_2) \dot{q}_2 & 0 \\ -l_1 \sin(q_2)(l_2 m_3 + l_{21} m_2) \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Vector de pares gravitacionales.

De una manera más simple y teniendo en cuenta la orientación de los ejes al calcular la cinemática del robot, se obtiene el que vector gravedad es el siguiente:

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

Por consiguiente el modelo dinámico del robot SCARA analizado se expresa mediante la ecuación (3. 25) :

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (3. 25)$$

En este caso se analizara la Dinámica Inversa, la cual nos permite obtener el valor del vector τ , el cual nos da los valores máximos del torque que se aplican en cada articulación.

Obtenido los términos necesarios para el modelo dinámico del robot las introducimos en un software matemático especializado, en el cual podremos realizar la simulación y de esta manera obtener los valores máximos de torque en cada articulación.

Simulación Dinámica Inversa.

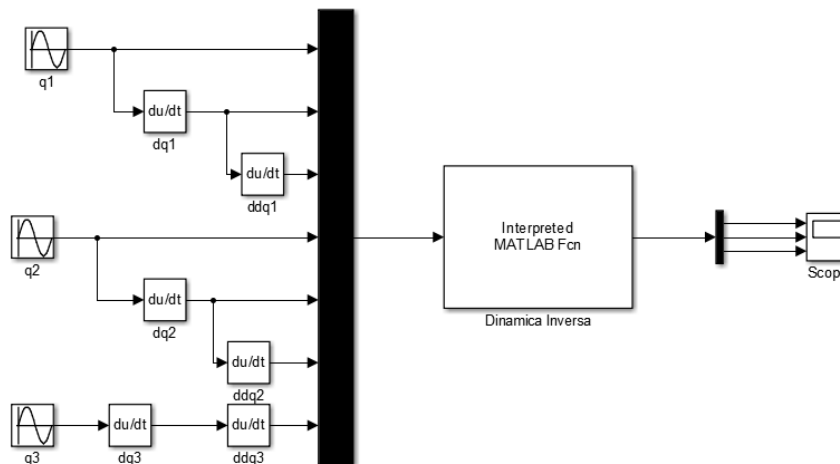


Figura 34 Modelo Dinámico Robot SCARA en Simulink

Articulacion 1.

En la Figura 35 se puede observar la gráfica del comportamiento de la primera articulación en la cual se tiene que el torque máximo es de 2.8 Nm.

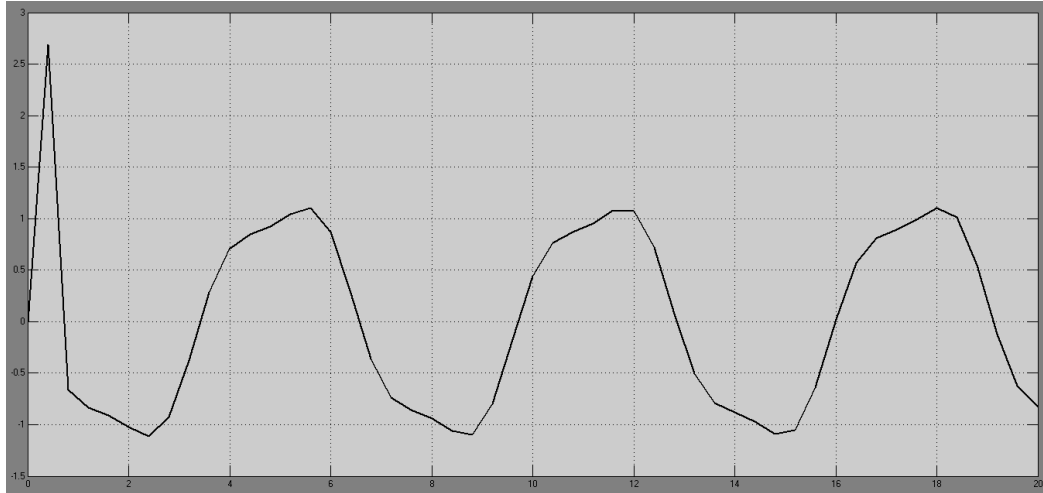


Figura 35 Gráfica Torques Articulación 1

Articulación 2.

En la Figura 36 se tiene de igual manera el comportamiento de los torques en la articulación 2 en la cual se obtiene que el máximo torque es de 2.4 Nm.

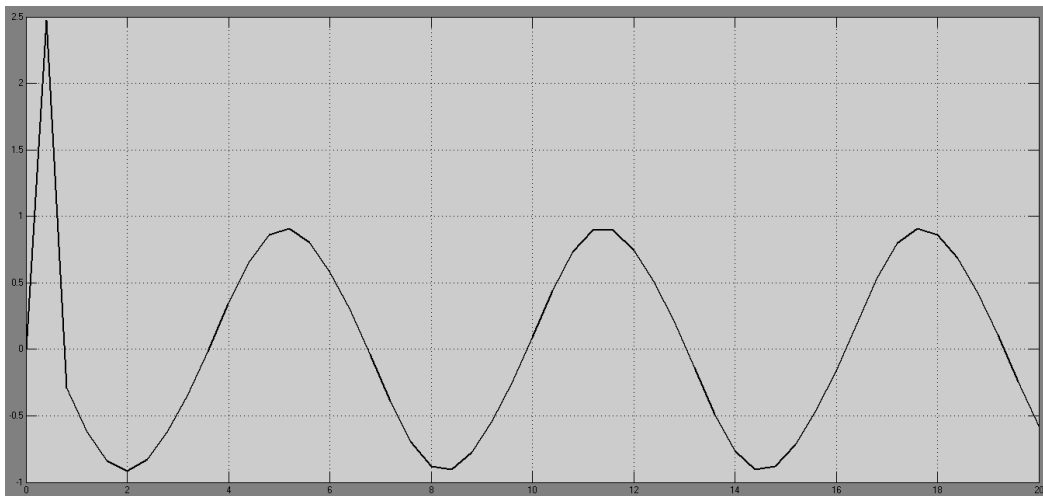


Figura 36 Torques en Articulación 2

Con las gráficas anteriores se tiene que, en la primera articulación es donde se produce el mayor torque lo cual es lógico debido a que dicha articulación es la que soporta el mayor peso del robot.

Selección de Actuadores del Robot

En la sección anterior se determinó los torques máximos en cada una de las articulaciones, dicho valor será el necesario para poder elegir el motor adecuado para mover cada una de ellas.

En base al robot existente en la celda, se tiene que los motores utilizados en el mismo, son motores DC IG52 de Shayang Ye Industrial Co., Ltd. (Ver Figura 37) Los cuales tienen las características que se detallan en la Tabla 13. Por tanto para el nuevo robot se utilizará un motor de la misma serie y del mismo fabricante por motivos de costo, las características de dicho motor son se detallan en la Tabla 13:



Figura 37 Motor DC serie IG52

Fuente: (Shayang, 2017)

Tabla 13
Características Actuadores Robots SCARA

Característica	Valor Motores Robot	Valor Motores Robot a
	Disponible	Construir
Torque	45 kgf-cm	33 kgf-cm
RPM	67 rpm	82 rpm
Voltaje	24 VDC	24 VDC
Reducción	1:53	1:43
Corriente	3.85 A	3.85 A
Peso	1.6 kg	1.6 kg

Fuente: (Shayang, 2017)

Como se puede apreciar el torque, el cual es la características más importante por la que se hace la selección del motor es de 33 kgf-cm que al transformarlo en Nm es aproximadamente 3.3 Nm, con lo que se cumple con el torque necesario máximo el cual es de 1.8 Nm.

3.3.2 Subsistema 1. Geometría y Estructura Robot SCARA

En el primer subsistema a diseñar, se analizan diferentes alternativas de geometría y forma para un robot SCARA teniendo en cuenta diferentes aspectos, como por ejemplo estética, peso, método de accionamiento de articulaciones etc. Posteriormente se realiza la selección adecuada de los actuadores para el movimiento del mismo, y finalmente se selecciona el efector final óptimo teniendo en cuenta la aplicación en la que se utilizara dicho robot.

3.3.2.1 Geometría

El robot a construirse tendrá la misma forma y dimensiones del robot existente, con la diferencia que se determinará un material de tal manera que el robot no sea muy pesado. El diseño CAD se puede observar en la Figura 38.



Figura 38 Diseño CAD robot SCARA

3.3.2.2 Diseño de Eslabones

Material de los Eslabones

Para los eslabones se tiene las siguientes alternativas de material de construcción: aluminio, acero, duralon. En la Tabla 14 se detallan las principales características de estos materiales, para posteriormente determinar el más adecuado.

Tabla 14

Alternativas para material de los eslabones

	Solución	Características
A	Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> • Costo: 20\$ • Liviano • Baja Dureza • Comportamiento a temperaturas elevadas disminuye • Dilatación térmica muy elevada

CONTINÚA →

B	Acero	<ul style="list-style-type: none"> • Costo: 15\$ • Alta Dureza • Muy Pesado • Maquinabilidad moderada • Ideal para construcción de estructuras
C	Duralon	<ul style="list-style-type: none"> • Buena Resistencia Mecánica • Buena resistencia a fatiga • Alta resistencia a la compresión • Bajo Costo

Selección de Alternativa

Para la selección de una de las alternativas anteriores se tomara en cuenta los siguientes aspectos.

- Se requiere reducir el peso del robot.
- Alta maquinabilidad del material
- Bajo costo
- Posee altas propiedades mecánicas

Posteriormente se realiza una ponderación de criterios de tal manera que la selección sea más óptima. En la Tabla 15 se tiene las ponderaciones de cada uno de los criterios analizados teniendo un valor alto el criterio de mayor importancia.

Tabla 15

Ponderaciones de cada criterio para selección de alternativa

Criterio	Peso	Maquinabilidad	Costo	Propiedades Mecánicas	$\Sigma+1$	Pond.
Peso	-	5	2.5	2.5	11	0.30
Maquinabilidad	0	-	2.5	2.5	6	0.16
Costo	5	5	-	2.5	13.5	0.37
Propiedades Mecánicas	2.5	2.5	0	-	6	0.16
				Total	36.5	1.00

Una vez analizada la importancia de cada criterio con respecto a otro, se realiza un análisis de cada alternativa en base a los criterios establecidos previamente. (Tabla 16) y de esta manera se selecciona una de las soluciones planteadas.

Tabla 16
Ponderación de cada Alternativa frente a cada criterio

Peso	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa A	-	5	0	6	0.29
Alternativa B	5	-	0	6	0.29
Alternativa C	2.5	5	-	8.5	0.41
				20.5	1.00
Maquinabilidad					
Alternativa A	-	5	0	6	0.33
Alternativa B	0	-	0	1	0.06
Alternativa C	5	5	-	11	0.61
				18	1.00
Costo					
Alternativa A	-	5	0	6	0.33
Alternativa B	0	-	0	1	0.06
Alternativa C	5	5	-	11	0.61
				18	1.00
Propiedades Mecánicas					
Alternativa A	-	0	2.5	3.5	0.19
Alternativa B	5	-	5	11	0.61
Alternativa C	2.5	0	-	3.5	0.19
				18	1.00

En la Tabla 17 se tiene las ponderaciones de las alternativas en base a cada criterio, de tal manera que se selecciona la alternativa con la mayor puntuación, es decir la que cumple de mejor manera cada criterio

Tabla 17
Selección de alternativa

	Peso	Maquinabilidad	Costo	Propiedades Mecánicas	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa A	0.11	0.06	0.08	0.05	0.30	2
Alternativa B	0.02	0.01	0.02	0.15	0.20	3
Alternativa C	0.19	0.11	0.15	0.05	0.50	1

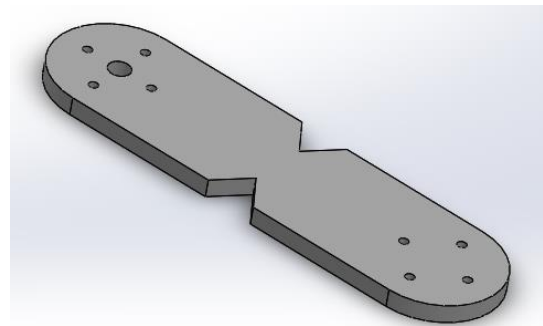
Según la Tabla 17 la mejor alternativa sería DURALON, lo cual podría ser no tan real, debido a que no se han analizado de manera matemática, algunos aspectos sobre todo la deformación del eslabón frente a las diferentes cargas a las que será sometida.

Es por eso, que se realizará el cálculo de dicha deformación la cual debe ser muy pequeña, para esto se toma de la tabla de selección las dos alternativas de mayor ponderación las cuales son aluminio y duralon, y en base al cálculo de la deformación de cada uno de estos materiales se realiza la selección del material en la que se produzca la menor deformación.

En la Figura 39 se tiene el diseño de los eslabones o brazos que realizan el movimiento de las articulaciones del robot. Las dimensiones de los eslabones se pueden ver en Anexo-Planos



(a)



(b)

Figura 39-(a) Eslabón 2, (b) Eslabón 1

Calculo Deformaciones

En la Figura 40 se observa el eslabón inferior en el cual se tiene el mayor torque, con las cargas a las cuales estará sometido.

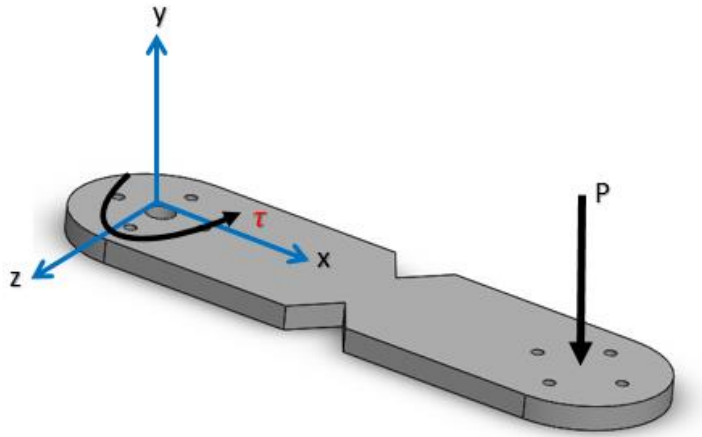


Figura 40 Cargas existentes en eslabón inferior

En donde:

$P = 3kgf$ (Peso aprox. entre motor, y actuador lineal)

$\tau = 2Nm$: (Torque máximo en articulación)

Como se puede observar en la Figura 40 tanto la carga P como el torque τ actúan en planos diferentes, por lo que se debe realizar un análisis únicamente de la carga que produzca flexión, la cual es únicamente la carga P .

Trasladando el eslabón a un diagrama de barra, se tiene lo siguiente:

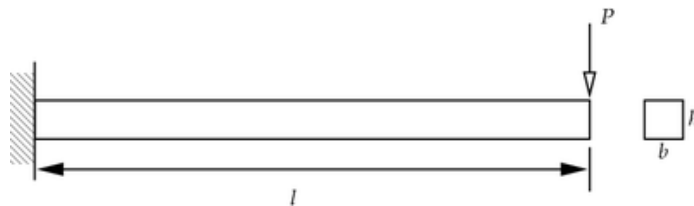


Figura 41 Diagrama de barra de eslabón inferior

El empotramiento a que el extremo del eslabón estará anclado a la flecha del motor. Los valores para las variables son:

$$P = 3kgf$$

$$l = 27.5 \text{ cm}$$

$$b = 7.5 \text{ cm}$$

$$h = 1 \text{ cm}$$

Para una barra empotrada se tiene que la máxima deformación debida a una carga puntual en el extremo, está definida por la ecuación (3.26) (Budynas & Nisbett , 2011):

$$y_{max} = -\frac{Pl^3}{3EI} \quad (3.26)$$

Donde se tienen los siguientes valores:

$$I = 4 \times 10^{-7} m^4$$

$$E_1 = 6.9 \times 10^{10} \frac{N}{m^2} \quad (\text{Aluminio})$$

$$E_2 = 2.62 \times 10^9 \frac{N}{m^2} \quad (\text{Duralon})$$

Aplicando la ecuación (3.30) se tiene:

$$y_{max\text{alu}} = 7.39 \times 10^{-3} mm$$

$$y_{max\text{dura}} = 0.16 \text{ mm}$$

Con los valores calculados entonces se tiene que el material más adecuado para los eslabones es el ALUMINIO, ya que con dicho material se tiene una deformación muy pequeña, y cumple con los aspectos previamente establecidos en las matrices de selección.

Para corroborar los valores obtenidos se realiza la simulación CAE del eslabón, en la cual se obtiene que la deformación máxima es de 7.15×10^{-3} el cual es muy similar al valor calculado analíticamente. Ver Figura 42.

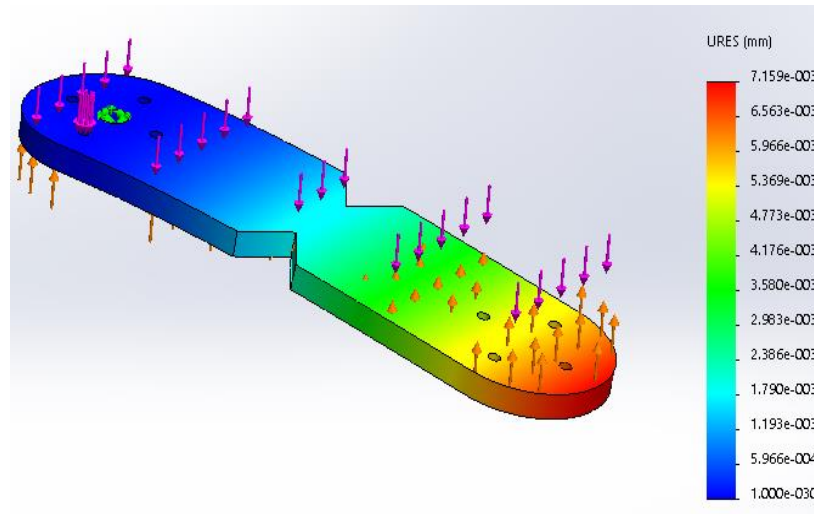


Figura 42 Análisis CAE, eslabón inferior deformaciones

En la Figura 43 se puede apreciar de igual manera el factor de seguridad en todo el elemento teniendo que el mínimo factor de seguridad es de 76, con lo que se concluye que el aluminio es el material adecuado para cada eslabón. Como se diseña el eslabón más crítico, es decir, el que mayor carga soporta por tanto, el material también es el adecuado para el eslabón superior el cual soporta una carga menor.

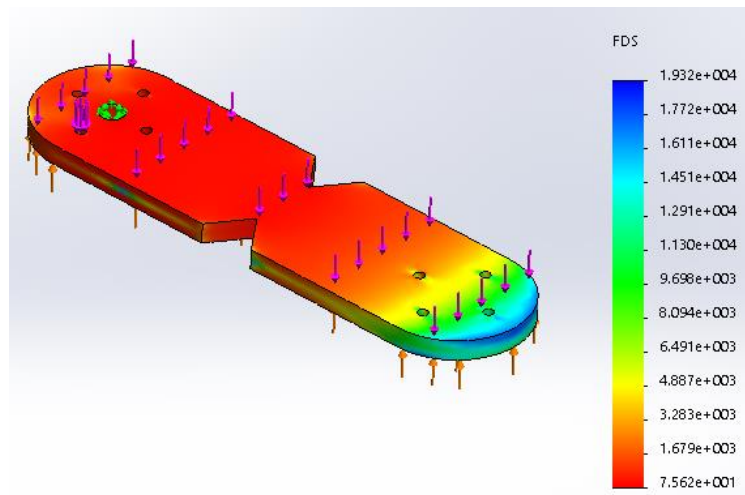


Figura 43 Análisis CAE, factor de seguridad

Tipo de Accionamiento

Se tiene diferentes tipos de accionamientos para una articulación de un robot, las cuales dependen de diferentes aspectos al momento de elegir la más adecuada. Los tipos de accionamiento son: (Ibarra, 2017)

- Directo
- Banda
- Engranés
- Cadenas
- Piñón Cremallera

Cada uno de las transmisiones dadas, tienen sus diferentes ventajas y desventajas, algunas son exclusivas para un tipo de articulación.

Tabla 18
Ventajas y desventajas de los tipos de Accionamientos

Tipo Accionamiento	Ventajas	Desventajas
Directo	-Posicionamiento Rápido -Simplifica sistema Mecánico	-Necesidad de motores de par elevado a bajas revoluciones
Banda	-Amortiguan Impactos -Simplifican la transmisión -Silencioso	-Deslizamientos
Engranés	-Mayor Torque -No resbalan entre sí	-Velocidades Bajas -Lubricación
Cadenas	-Gran torque -No hay deslizamiento	-Lubricación -Ruidoso
Piñón Cremallera	-Precisión en posicionamiento -Transmite Grandes Esfuerzos	-Preferentemente para articulación prismática -Reductor de Velocidad

Fuente: (Ibarra, 2017)

En la Tabla 18 se pueden observar diferentes aspectos para cada tipo de accionamiento, dichos aspectos son los que tomaremos en cuenta al momento de seleccionar uno ellos.

Selección de Alternativa

De acuerdo a las características requeridas para el robot, costo y otros aspectos tomados en cuenta se determina que el tipo de accionamiento para el robot es Accionamiento Directo. Los aspectos tomados en consideración son:

- Costo de Implementación
- Ruido
- Simplicidad
- Posicionamiento

De acuerdo a lo establecido, se tiene las siguientes opciones: Ver Tabla 19.

Tabla 19
Alternativas para Accionamiento de brazos del robot

Alternativa	Tipo Accionamiento	Ventajas	Desventajas
A	Directo	-Posicionamiento Rápido -Simplifica sistema Mecánico	-Necesidad de motores de par elevado a bajas revoluciones
B	Banda	-Amortiguan Impactos -Simplifican la transmisión -Silencioso	-Deslizamientos
C	Engranajes	-Mayor Torque -No resbalan entre sí	-Velocidades Bajas -Lubricación

En la Tabla 20 se establece una comparación entre los aspectos anteriores para determinar cuál es el criterio más importante.

Tabla 20
Criterios para selección de tipo de accionamiento

Criterio	Costo Implem.	Menor Ruido	Simplicidad	Posicionamiento	$\Sigma+1$	Pond.
Costo Implem.	-	5	2.5	2.5	11	0.32
Menor Ruido	0	-	0	2.5	3.5	0.10
Simplicidad	2.5	5	-	2.5	11	0.32
Posicionamiento	2.5	2.5	2.5	-	8.5	0.25
				Total	34	1.00

De igual manera se evalúa cada solución frente a cada criterio (Tabla 21) y de esta manera se selecciona una de las soluciones planteadas.

Tabla 21
Ponderaciones de alternativas frente a cada criterio

Costo	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa A	-	5	5	11	0.61
Alternativa B	0	-	5	6	0.33
Alternativa C	0	0	-	1	0.05
				18	1.00
Menor Ruido					
Alternativa A	-	2.5	5	8.5	0.47
Alternativa B	2.5	-	5	8.5	0.47
Alternativa C	0	0	-	1	0.05
				18	1.00
Simplicidad					
Alternativa A	-	5	5	11	0.61
Alternativa B	0	-	5	6	0.33
Alternativa C	0	0	-	1	0.05
				18	1.00
Posicionamiento					
Alternativa A	-	5	2.5	8.5	0.47
Alternativa B	0	-	0	1	0.05
Alternativa C	2.5	5	-	8.5	0.47
				18	1.00

Finalmente en la Tabla 22 se tiene la ponderación de cada alternativa respecto a cada criterio, de tal manera que al final se seleccionará la alternativa con la prioridad 1 la cual será la que cumpla de mejor manera los requerimientos establecidos.

Tabla 22
Selección alternativa de accionamiento

	Costo Implem	Menor Ruido	Simplicidad	Posicionamiento	$\Sigma+1$	Pond.
Alternativa A	0.196	0.052	0.196	0.118	0.562	1
Alternativa B	0.106	0.052	0.107	0.014	0.280	2
Alternativa C	0.018	0.006	0.016	0.118	0.158	3

De acuerdo a los resultados de la Tabla 22 se selecciona el Accionamiento Directo.

3.4 Módulo 2. Celda Trabajo Colaborativo

3.4.1 Subsistema 1. Ampliación Banda Transportadora

En el Modulo 2 Subsistema 1, se realiza un rediseño del sistema de transporte (banda transportadora). Es decir, un diseño total debido a que la longitud total de la banda aumentará en relación a la anterior, de igual manera se realiza el diseño de los elementos de la banda, para verificar que soportarán las nuevas cargas a las que estará sometida.

La longitud total de la nueva banda es de 1.80 m, debido a que se integrará un segundo robot SCARA y con dicha longitud los dos robots tendrán el espacio suficiente para realizar su trabajo y evitar choques.

En la Figura 44 se puede observar la estructura diseñada.



Figura 44 Diseño CAD extensión banda transportadora

El material con el que se construirá la extensión, será de Acero A36 en la forma de tubo rectangular de 50x25 mm y perfil en C de 100x50 mm, los planos de la estructura se detallan en Anexos.

3.4.1.1 Cálculo de Fuerzas, Torques y potencia requerida por el motor

Consecuencia aumentar la longitud total de la banda transportadora, se debe recalcular las fuerzas, torques en los rodillos, ejes de los rodillos y potencia requerida en el motor, debido a que al haber mayor distancia de recorrido se requerirá mayor velocidad en la banda en consecuencia los valores anteriormente detallados cambiarán. Una vez calculados dichos valores se determinará si los elementos actuales (rodillos, ejes, motor) son los adecuados para las nuevas características de la celda de trabajo. Para el cálculo de estos valores nos guiaremos en el catálogo de DUNLOP.

Capacidad de Transporte

Según el catálogo de DUNLOP (DUNLOP, 2009), la capacidad de transporte viene dada en toneladas por hora (ton/h) y se expresa de la siguiente manera:

$$Q_t = 3600 \cdot v \cdot A \cdot \rho \cdot k \quad (3.27)$$

Se tiene que la velocidad máxima de la banda es $v = 0,15 \text{ m/s}$ y debido a que el material a transportar, motor a analizar son los mismos del trabajo realizado por (Montufar & Salazar, 2017) se tiene que: $k = 1$, $A \cdot \rho = 7.85 \cdot 10^{-4} \text{ ton/m}$.

Por tanto aplicando (3.27) se tiene que la capacidad de carga es:

$$Q_t = 0,424 \text{ ton/h}$$

Fuerzas en la banda

La fuerza para que una banda transporte un elemento de un punto a otro viene dada por la ecuación (3.28) (ROULUNDS, 2001).

$$F_1 = (C \cdot f \cdot L \cdot G) \cdot g \quad (3.28)$$

En el proyecto se debe tomar en cuenta la nueva longitud de la banda la cual es $L=1,8 \text{ m}$ (1.2 m longitud anterior)

El factor C se denomina coeficiente de fricción su ecuación se obtiene en la norma DIN 22101 y es:

$$C = 15.9 \cdot L^{-0.61} + 0.77 \quad (3.29)$$

El término f se denomina coeficiente de fricción de las partes móviles el cual depende del tipo de rodillos, se toma un valor de 0.020 el cual es un valor estándar para ambientes normales de trabajo, este valor se encuentra en el catálogo de ROULUNDS. Por tanto los factores C y f son:

$$C = 12.27$$

$$f = 0.020$$

Para el termino G se utiliza la ecuación (3. 30), de igual manera se debe tener en cuenta la nueva longitud de la banda ($L=1.8$ m), el resto de términos al ser los mismos rodillos y banda, se toman los valores utilizados en el trabajo previo (Montufar & Salazar, 2017).

$$G = 2G_b + \frac{G_{ro}}{S_1} + \frac{G_{ru}}{S_2} \quad (3. 30)$$

$$G_b = 0,81 \text{ kg/m}$$

$$G_u = 0 \text{ kg} \quad (\text{No se utilizan rodillos inferiores})$$

$$G_{ro} = 3 \text{ kg}$$

Por tanto:

$$G = 3.38 \text{ kg/m}$$

Calculados los valores necesarios para la ecuación (3. 28) se tiene que F_1 es:

$$F_1 = 13.83 \text{ N}$$

La fuerza anterior es la necesaria para mover únicamente la banda, ahora se calculará la fuerza para mover la banda con el material a trasladar sobre ella. Para ello se utiliza la ecuación (3. 31). (ROULUNDS, 2001)

$$F_2 = \left(\frac{C \cdot f \cdot L \cdot Q_r}{3.6 \cdot v} \right) \cdot g \quad (3. 31)$$

Sustituyendo los valores establecidos anteriormente en (3. 31) se tiene que:

$$F_2 = 3.21 \text{ N}$$

Potencia requerida por la banda

Una vez que se determinaron las nuevas fuerzas a las que estará sometida la banda debido a la nueva longitud, se debe recalcular la potencia de requerida de la misma y de esta manera saber si el motor existente abastecerá dicha potencia.

Según el catálogo de ROULUNDS, para calcular la potencia teórica necesaria se utiliza la ecuación (3. 32). (ROULUNDS, 2001)

$$P = \left(\frac{F_1 + F_2 + F_3}{1000} \right) + P_s \quad (3. 32)$$

Calculamos primero P_s utilizando ecuación (3. 33):

$$P_s = 0.08 \cdot v \cdot l \quad (3. 33)$$

$$P_s = 0.08 \cdot (0.15m/s) \cdot (1.7 m)$$

$$P_s = 0.0204 kW$$

Retomando la ecuación (3. 32) se tiene entonces:

$$P = \left(\frac{13.83 + 3.21 + 0}{1000} \right) + 0.0204$$

$$P = 0.02296kW = 22.96W$$

Considerando pérdidas mecánicas, perdidas por eficiencia la potencia definitiva viene dada por:

$$P_T = \frac{P}{\eta \cdot \varepsilon} \quad (3. 34)$$

Los coeficientes η y ε son Eficiencia del motor y Eficiencia mecánica de la transmisión respectivamente. Los valores de estas constantes se encuentran en catálogos especializados. CEMA (Conveyor Equipment Manufactures Association), y DUNLOP respectivamente.

$$\varepsilon = 0.9 \text{ (Reductor de engranes rectos)}$$

$$\eta = 0.85 \text{ (Eficiencia de un motor eléctrico)}$$

Por tanto la potencia definitiva que se requiere para la banda es:

$$P_T = 30.01W$$

El motor actual tiene una potencia de 35 W según sus características técnicas, por lo tanto dicho motor es idóneo para las nuevas características de la banda, es decir, tiene la potencia necesaria para moverla. En la Figura 45 se puede observar las características técnicas del motor.

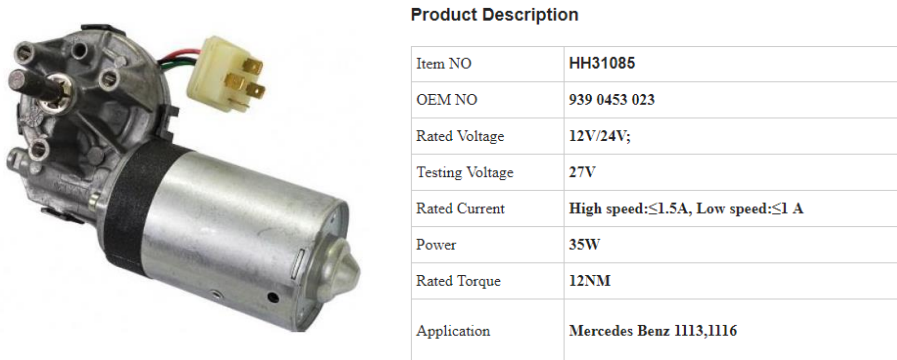


Figura 45 Motor BOCH, Características Técnicas
Fuente: (HUIHAI, 2017)

Tensiones en la banda

Ahora calcularemos las nuevas fuerzas a las que estará sometida la banda, recordando que se ha cambiado la longitud total de la banda y la potencia requerida para moverla.

La banda logra moverse cuando se produce una diferencia de tensiones en los lados del rodillo motriz. Se tiene una tensión de lado ajustado T_1 , y una denominada tensión de lado flojo T_2 , la diferencia entre dichas tensiones se denomina tensión efectiva T_e , la cual realiza el movimiento de la banda. Se calcula mediante la ecuación (3.39). En la Figura 46 se tiene un esquema en las que se observa las tensiones sobre el rodillo motriz.

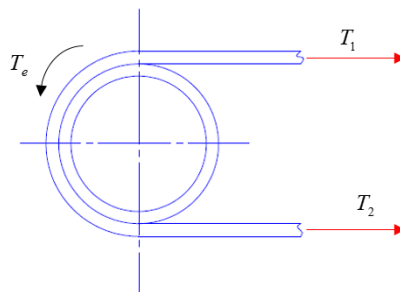


Figura 46 Tensiones en la banda

$$T_e = \frac{1000P_T}{v} \quad (3.35)$$

Con los valores calculados anteriormente $v = 0.15 \text{ m/s}$, $P_T = 0.03 \text{ Kw}$ reemplazamos en la ecuación (3.35):

$$T_e = 200 \text{ N}$$

Una vez obtenida la tensión efectiva de la banda se calcula la tensión de lado ajustado T_1 con la ecuación: (DUNLOP, 2009):

$$T_1 = T_2 \cdot m \quad (3.36)$$

El parámetro m representa el coeficiente de accionamiento y se lo calcula con la ecuación (3.37), éste coeficiente depende del ángulo de contacto entre la banda y el rodillo.

$$m = 1 + \left(\frac{1}{e^{\mu\theta \cdot \frac{\pi}{180}} - 1} \right) \quad (3.37)$$

El valor de μ es de 0.35 considerando un tambor sin recubrimiento y seco (DUNLOP, 2009), y el ángulo θ tendrá un valor de 180° ya que la banda se encuentra totalmente horizontal.

$$m = 1.5$$

$$T_1 = 200 \cdot 1.5$$

$$T_1 = 300 \text{ N}$$

Según el catálogo de bandas transportadoras al momento de implementar un tensor manual la fuerza de lado ajustado aumenta un 20%, por lo que T_1 es:

$$T_1 = 360 \text{ N}$$

La tensión de lado flojo se obtiene mediante sumatoria de fuerzas, como se indica en la ecuación (3.38).

$$T_2 = T_1 - T_e \quad (3.38)$$

$$T_2 = 160N$$

Finalmente se calcula la tensión de trabajo unitaria T_μ , dicha tensión es la tensión máxima a la que estará sometida la banda por mm de ancho, se calcula mediante la ecuación (3.39). (DUNLOP, 2009).

$$T_\mu = \frac{T_1}{1000 \cdot B} \quad (3.39)$$

El término B es el ancho de la banda dado en metros, $B = 0.3 \text{ m}$. Por tanto:

$$T_\mu = 1.2 \frac{N}{mm}$$

Al momento de hacer la selección de banda se recomienda utilizar un factor de seguridad que este entre 8 y 10 (DUNLOP, 2009), Entonces se tiene:

$$T_N = s \cdot T_\mu \quad (3.40)$$

Finalmente se comprueba la resistencia de la banda a las nuevas cargas, de acuerdo a las especificaciones de la banda implementada en el sistema, la resistencia a la rotura es de 160 N/mm (ESBELT, 2013), teniendo la nueva tensión a la rotura calculada se tiene entonces un factor de seguridad de:

$$s = \frac{160}{12} = 13.33$$

Al obtener el factor de seguridad concluimos que la banda soportara las nuevas cargas, por lo que se acepta la banda actual.

Rodillos

Una vez realizado el análisis de fuerzas a las que estará sometida la banda, ahora se realizará un estudio a los rodillos tomando en cuenta dichas fuerzas, de tal manera que se pueda determinar si se necesita cambiar estos elementos o si los actuales son suficientes para soportar las nuevas cargas.

Se conoce que los rodillos tienen las siguientes características:

- $D_m = D_c = 76.2 \text{ mm} = 3 \text{ pulg}$ (Recomendación de Fabricante)
- Material de Rodillos Acero ASTM A53
 - Limite Fluencia: 205 MPa
 - Resistencia a la tracción: 330 Mpa

Para el análisis CAE, se toma en cuenta las tensiones del lado flojo y lado tenso de la banda, dichas cargas son a las que estará sometido el tambor motriz al estar en contacto con la banda y la torsión que ejerce el motor.

El torque del motor se calcula mediante la ecuación (3. 41):

$$T = \frac{P_T}{n} \quad (3. 41)$$

Calculamos la velocidad angular necesaria para poder mover la banda a una velocidad de $v = 0.15 \text{ m/s}$ mediante la ecuación:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3. 42)$$

Donde r representa el radio del tambor en metros.

$$D_c = 76.2 \text{ mm}$$

$$r = 38.1 \text{ mm} = 0.0381 \text{ m}$$

Por lo que la velocidad angular es:

$$\omega = \frac{0.15m/s}{0.0381m} = 3.94 \text{ rad/s}$$




$$n = 37.6 \text{ rpm}$$

Aplicando (3. 41) entonces se tiene que el torque al cual estará sometido el tambor del rodillo motriz es:

$$T = 7.61Nm$$

Con estos datos, se realiza el estudio CAE en el que analizaremos las deformaciones máximas del tambor y el factor de seguridad, tal y como se puede ver en la Figura 47 y en la Figura 48.

Tabla 23
Cargas Rodillo Motriz

Carga	Color
Fuerza Lado Flojo	
Fuerza Lado Tenso	
Torsión del Motor	

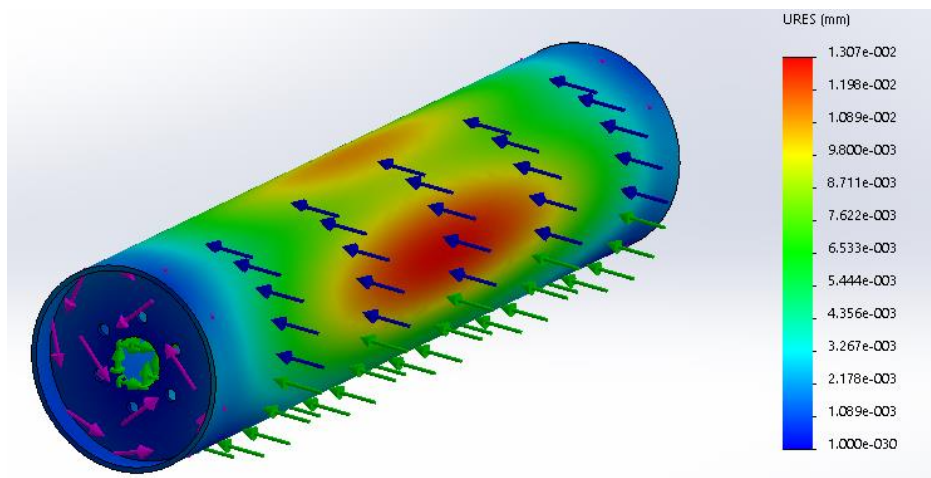


Figura 47 Deformaciones en rodillo motriz

En la Figura 47 se tiene las deformaciones del rodillo motriz, teniendo una máxima deformación de 0.013 mm.

La Figura 48 nos muestra el factor de seguridad del rodillo motriz, dándonos un factor de seguridad mínimo de 29, de tal manera que se concluye que los rodillos soportarán las cargas antes mencionadas.

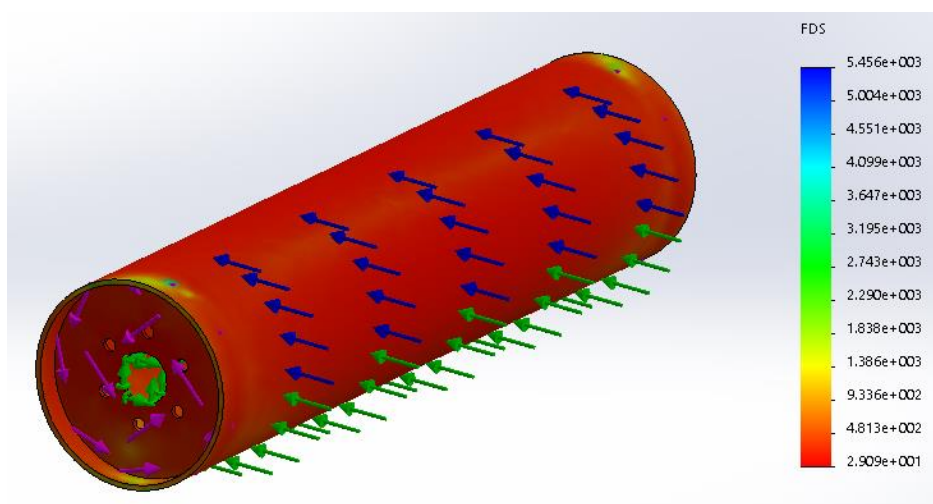


Figura 48 Factor de seguridad rodillo motriz

Una vez que se ha logrado determinar que los rodillos actuales son idóneos y soportaran las cargas correspondientes, se procede a diseñar los elementos del rodillo que son ejes, rodamientos etc. En este caso el proceso de diseño se lo realizará de manera inversa, es decir, teniendo los elementos se analiza si éstos soportarán a las nuevas cargas previamente calculadas. En la Figura 49 se tiene un esquema del rodillo motriz y sus elementos.

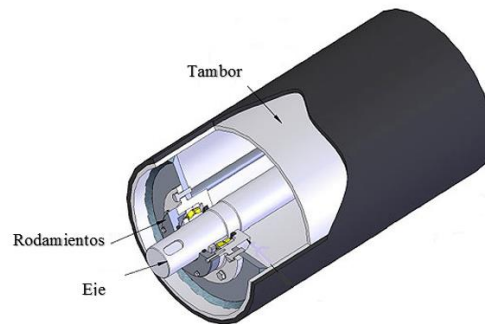


Figura 49 Elementos Rodillo Motriz

Para el eje se tienen los siguientes datos:

Tabla 24
Características Eje Rodillo Motriz

Dato	Valor
Diámetro	12mm
Material	Acero AISI 1020
Límite de Fluencia	210 MPa
Resistencia a la tracción	380 MPa

En la Figura 50 se muestra el diagrama de cuerpo libre con las cargas a las que estará sometido el eje del rodillo. Se conocen las siguientes fuerzas

$$T_1 = 360N$$

$$T_2 = 160N$$

$$q_t = 19.78N$$

$$P_T = 30.01W.$$

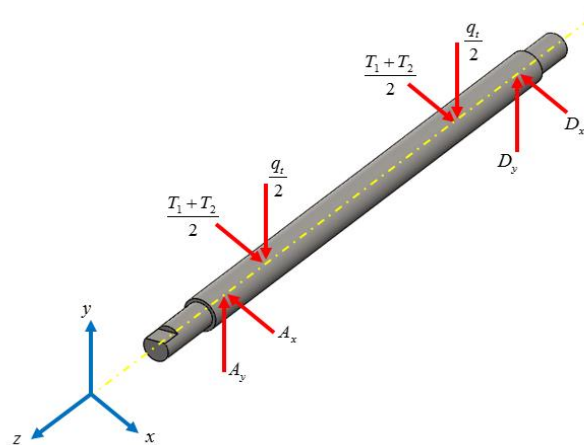


Figura 50 Diagrama de cuerpo libre del eje rodillo

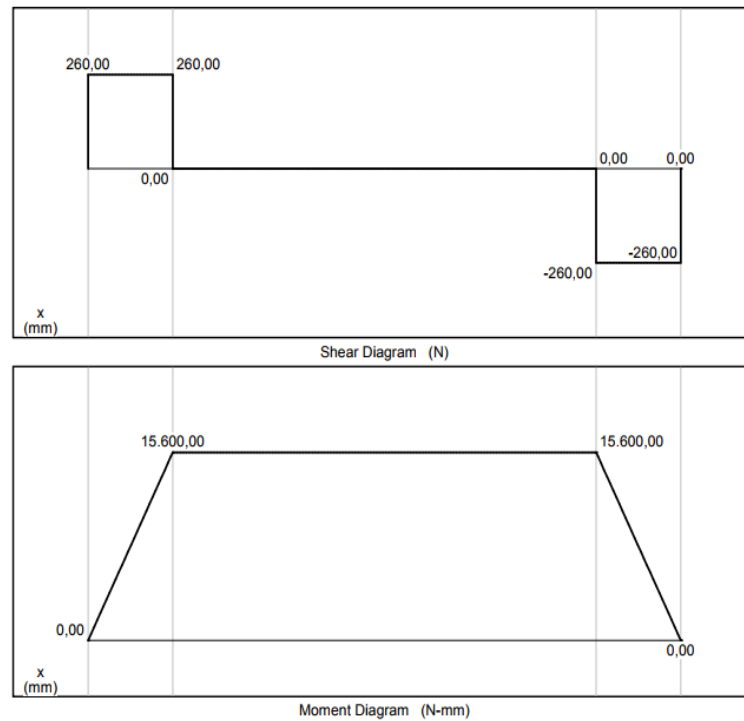
$$T_1 + T_2 = 520N$$

$$\frac{q_t}{2} = 9.89N$$

$$A_y = D_y = \frac{q_t}{2} = 9.89N$$

$$A_x = D_x = \frac{T_1 + T_2}{2} = 260N$$

Se obtienen los diagramas de fuerza cortante y momento flector tal como se indica en la Figura 51 (a) y (b), a partir de éstos se obtiene el momento total máximo.



(a)

CONTINÚA →

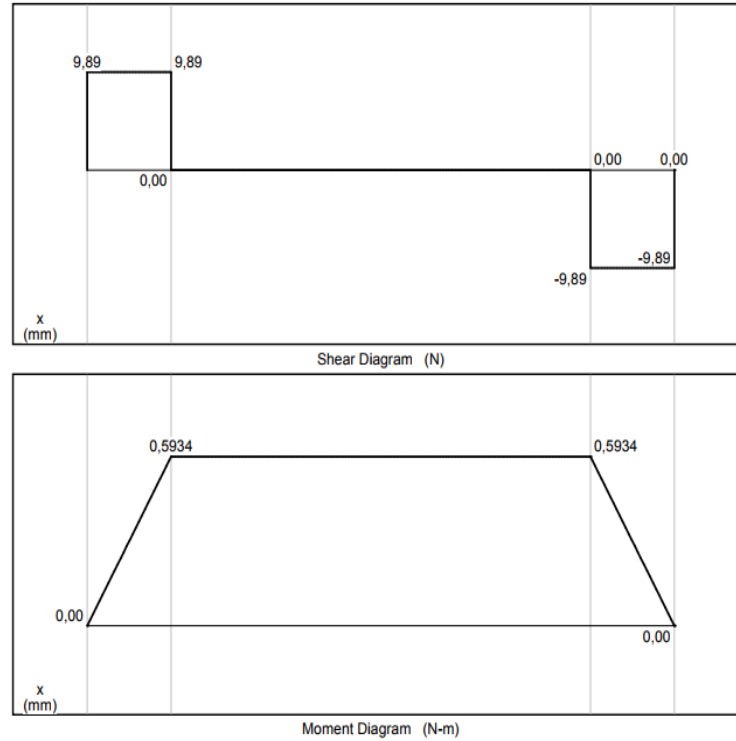


Figura 51 Diagrama Fuerza Cortante y momento flector, ejes de rodillo motriz. (a) xz, (b) yz

Con los valores obtenidos en los diagramas anteriores, se calculan el momento total máximo en el eje.

$$M_{Byz} = M_{Cyz} = 9.89 \times 0.0485 = 0.48 Nm$$

$$M_{Bxz} = M_{Cxz} = 260 \times 0.0485 = 12.61 Nm$$

$$M_{\max} = \sqrt{0.48^2 + 12.61^2} = 12.62 Nm$$

Para el diseño de un eje sometido a cargas cíclicas, se debe realizar un análisis de falla por fatiga, se toma el criterio de ED-Goodman, la cual se expresa mediante la ecuación (3. 43). (Norton, 2011)

$$d = \left\{ \frac{32 \cdot s}{\pi} \cdot \left[\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4} (k_{fs} T_a)^2}}{S_e} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4} (k_{fsm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{1/3} \quad (3.43)$$

Se conoce que el material del eje es el acero AISI 1020 cuyas características se pueden ver en la Tabla 24, para conocer el valor de los diferentes factores de la ecuación (3.43) se tiene la Tabla 25.

Tabla 25
Significado y Valores de los términos para el diseño del eje

Símbolo	Descripción	Valor
d	Diámetro Eje (comercial)	12 mm
s	Factor seguridad	
k_f	Factor concentración de esfuerzo por fatiga a flexión	1
k_{fs}	Factor concentración de esfuerzo por fatiga a cortante	1
S_e	Límite Resistencia a la fatiga	146.01 MPa
k_{fm}	Factor concentrador de esfuerzos para esfuerzo medio a flexión	1
k_{fsm}	Factor concentrador de esfuerzos para esfuerzo medio a cortante	1
S_{ut}	Resistencia última a la tensión	380 MPa

Fuente: (Montufar & Salazar, 2017)

Para el cálculo de S_e se tiene la ecuación (3.44):

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (3.44)$$

Los valores para cada factor son:

$$k_a = 0.93$$

$$k_e = 0.868$$

$$k_c = k_d = k_f = 1$$

$$S'_e = 190MPa$$

Para k_b se debe tomar en cuenta el diámetro del eje, como se está analizando a un eje existente su diámetro es $d=12mm$, por tanto:

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} \\ 1.51d^{-0.157} \end{cases}$$

$$k_b = 0.953$$

De tal manera que el límite de resistencia a la fatiga es:

$$S_e = 0.93 \times 0.953 \times 0.868 \times 190$$

$$S_e = 146.01MPa$$

Se tiene además que $M_a = 12.62 Nm$ y $M_m = 0 Nm$ por cargas alternantes, se debe tener en cuenta el torque del motor ($T = 7.61 Nm$) el cual es constante por tanto: $T_a = 0 Nm$ y $T_m = 7.61 Nm$. Con los valores detallados en la Tabla 25 aplicamos la ecuación (3. 43) para obtener el factor de seguridad, el cual nos determinará si los ejes son adecuados o se requerirá cambiarlos.

De (3. 43) se tiene que:

$$s = \frac{d^3 \pi}{32 \cdot \left[\frac{\sqrt{(k_f M_a)^2 + \frac{3}{4} (k_{fs} T_a)^2}}{S_e} + \frac{\sqrt{(k_{fm} M_m)^2 + \frac{3}{4} (k_{fm} T_m)^2}}{S_{ut}} \right]}$$

Reemplazando valores:

$$s = 1.63$$

Finalmente con el valor obtenido de factor de seguridad, se concluye que los ejes soportaran las nuevas cargas y no fallarán.

Chumaceras

Por último se realiza los cálculos para la selección de las chumaceras adecuadas para los ejes de la banda. En la Figura 50 se muestran las fuerzas que actuarán sobre los rodamientos.

En base a las fuerzas establecidas, se calcula la nueva carga radial en los puntos A y D. Se define además que la fuerza axial es $F_a = 0 \text{ N}$.

$$R_A = R_D = \sqrt{9.89^2 + 260^2}$$

$$R_A = R_D = F_r = 260.19 \text{ N}$$

La carga estática se calcula con la ecuación (3. 45) considerando que $\frac{F_a}{F_r} \leq 0.8$

$$P_0 = F_r \quad (3. 45)$$

$$P_0 = 0.26 \text{ kN}$$

La carga dinámica viene dada por la ecuación (3. 46).

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3. 46)$$

En la ecuación anterior X y Y son factor radial y axial respectivamente, se tiene que $e = 0.22$. Se tiene que $\frac{F_a}{F_r} \leq e$, por lo tanto $X = 1$, $Y = 0$. Entonces la carga dinámica es:

$$P = 0.26 \text{ kN}$$

La capacidad de carga dinámica necesaria del rodamiento se determina por la ecuación (3. 47).

$$C_d = a_f \cdot X_D^{1/p} \cdot P \quad (3. 47)$$

Para calcular el término X_D de acuerdo a las condiciones establecidas, se calcula mediante la ecuación (3. 48). (Budynas & Nisbett , 2011)

$$X_D = \frac{60L_D n_D}{L_{10}} \quad (3. 48)$$

Para la ecuación anterior se tiene los siguientes datos: Ver Tabla 26

Tabla 26
Valores para determinar múltiplo de vida nominal

Símbolo	Descripción	Valor
L_D	Vida deseada en Horas	50000 h
n_D	Velocidad banda en rpm	38 rpm
L_{10}	Vida nominal 10^6 rev.	10^6

Fuente: (Montufar & Salazar, 2017)

Aplicando la ecuación (3. 48) se obtiene que X_D es:

$$X_D = 114$$

Para utilizar rodamientos en bandas transportadoras con rodillos se recomienda que $a_f = 4$. Y si se utiliza rodamiento de bolas el cual vamos a utilizar se tiene que $p = 3$. Por lo que sustituyendo valores en la ecuación (3. 47) se tiene que:

$$C_d = 4 \cdot (114)^{\frac{1}{3}} \cdot (0.26kN)$$

$$C = 5.04kN$$

Según las características de la Tabla 27 de la CHUMACERA UFC204-12, tomando en cuenta el diámetro del eje de los rodillos ($d=12mm$). Se concluye que la chumacera actual es adecuada para el sistema.

Tabla 27
Características chumacera CMB UFC204-12

Característica	Valor
Capacidad de carga estática	6.65 kN
Capacidad de carga dinámica	12.8 kN
Diámetro de eje	19.05 mm
Tipo Chumacera	Cuadrada de Pared
Peo	0.23 kg

Fuente: (Teach Industrial, 2009)

Finalmente calculamos la vida útil de la chumacera con la nueva carga.

$$L = \left(\frac{12.8}{0.26} \right)^3$$

$$L = 119319.1 \text{ millones } _{rev}$$

Una vez realizado los cálculos con las nuevas cargas y solicitaciones de la banda transportadora se realiza una tabla comparativa entre los valores originales de funcionamiento de la banda y los valores con las nuevas especificaciones de la misma.

Tabla 28
Comparación entre valores anteriores y los actuales con las nuevas características de la banda

Término	Descripción	Valor Anterior	Valor Actual
v [m/s]	Velocidad máxima banda	0.05	0.15
Q_t [ton/h]	Capacidad transporte de la banda	0.424	0.424
F_1 [N]	Fuerza para mover banda en vacío	14.55	13.83
F_2 [N]	Fuerza para mover banda con carga	2.77	3.21
P_T [W]	Potencia requerida motor	21.7	30.01
T_e [N]	Tensión efectiva	146.67	200
T_1 [N]	Tensión de lado ajustado	220	360
T_2 [N]	Tensión de lado flojo	117.33	160
T_u [N/mm]	Tensión trabajo unitaria	0.88	1.2

CONTINÚA→

T_N [N/mm]	Tensión de rotura	8.8	12
s_b	Factor seguridad de banda	21.59	13.33
D_m, D_C [mm]	Diámetro rodillo motriz	76.2	76.2
T [Nm]	Torque del motor	5.58	7.61
d [mm]	Diámetro eje del rodillo	12	12
S_e [MPa]	Limite Resistencia a fatiga	145.91	146.01
s	Factor seguridad ejes	2.17	1.63
R_A, R_D [N]	Fuerza Radial ptos. A y D	190.93	260.19
F_r [N]	Fuerza radial	190.93	260.19
P_0 [kN]	Carga estática	0.19	0.26
P [kN]	Carga dinámica	0.19	0.26
C_d [kN]	Capacidad de Carga dinámica	3.68	5.04
L [mill. rev]	Vida útil	305751.9	119319.1

En la Tabla 28 se detalla cada valor calculado, y comparado con el anterior de tal manera que se puede apreciar que debido al aumento de la distancia total de la banda, cada uno de los parámetros de diseño fue aumentando o disminuyendo de acuerdo al caso.

Finalmente en la Figura 52 se puede observar la nueva banda transportadora con la nueva longitud y sus características a ser construida para la celda de trabajo.



Figura 52 Diseño Final de Banda Transportadora

3.4.1.2 Control Electrónico de la Banda

Para el control de la nueva banda; como se puede ver en la Tabla 33 los valores de potencia requerida del motor está dentro de las especificaciones del motor existente, para su control al requerir que la velocidad de la misma cambie dependiendo de cada estado de la celda se utilizará el driver que se muestra en la Figura 53, en la Tabla 29 se listan sus especificaciones.

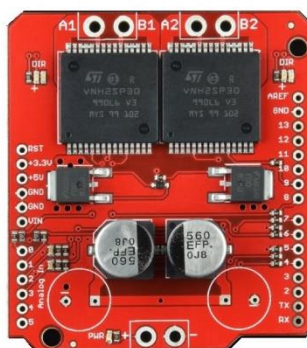


Figura 53 Módulo VNH2SP30

Tabla 29

Características Módulo PWM

Característica	Valor
Corriente salida	14 A
Corriente Pico	30 A
Voltaje alimentación	5V
Voltaje Salida	5-35V

El control de la banda se realiza a través del módulo de la Figura 53, el cual recibe la señal del planificador del estado actual de la celda y éste se encargará de ubicar la velocidad adecuada para el sistema.

3.5 Módulo 3. Unidad de Control de la Celda de trabajo

3.5.1 Subsistema 1. Tarjeta de control

La tarjeta de control se encargará de ejecutar las acciones en la celda de trabajo es decir enviar y recibir información de los sensores, actuadores y la comunicación entre el sistema y un ordenador.

3.5.1.1 Tipo de Controlador

El controlador a utilizar es del tipo AVR (Advance Virtual Risc) debido a que en la celda anterior se obtuvo un funcionamiento adecuado, además un bajo coste, software de programación libre, etc. El AVR seleccionado es el ATMEGA 2560 (Ver Figura 54), ya que posee una mayor cantidad de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, las cuales al aumentar un segundo robot se requieren, entre otras características detalladas en la Tabla 30.



Figura 54 Controlador ATMEGA 2560

Tabla 30

Características ATMEGA 2560

Características ATMEGA 2560	
FLASH	256KB
RAM	8KB
Velocidad	18MHz
Puertos	86 (14 PWM)
Voltaje Operación	5V
Temporizadores	6
Canales ADC	16 de 10 bits

Fuente: (ATMEL, 2016)

3.5.1.2 Algoritmo de Control

Como se dijo anteriormente la tarjeta de control será la encargada del funcionamiento de toda la celda de trabajo. El algoritmo de control de funcionamiento de la celda de trabajo está dividida en varias etapas.

- Visión Artificial.- Se encarga del reconocimiento de colores y formas.
- Filtro de Kalman.- Obtiene un punto de coordenadas de acuerdo a un sistema de referencia, la entrada de ésta etapa es el punto de coordenadas del centro de masa de los objetos detectados.
- Planificador.- En esta etapa se tiene una máquina de estados, la cual realizará la asignación de tareas para cada manipulador de la celda, es decir, enviará a cada robot la información y señales para que ejecuten una determinada acción.
- Posicionamiento de Robots.- Para asegurar que los manipuladores llegarán al punto indicado por el filtro y realicen su tarea, se implementa un control PID de posición.

En la Figura 55 se tiene un esquema general de las etapas para el control de la celda de trabajo.

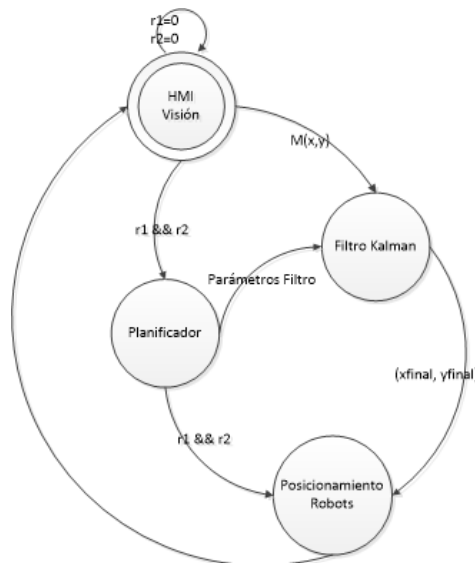


Figura 55 Etapas de control celda de trabajo

3.5.2 Subsistema 2. Visión Artificial y Predicción de posición

3.5.2.1 Visión Artificial

3.5.2.1.1 Iluminación y Ubicación de Cámara

La iluminación en un sistema de visión artificial es un factor muy importante al momento de realizar la detección de color, formas, etc. El propósito de la iluminación es de controlar la forma en que la cámara va a ver el objeto y asegurar que realice su objetivo. En el Capítulo 2 sección 2.6.2.1 se dio a conocer las tipos de iluminación que se pueden utilizar en un sistema de visión, por tanto teniendo en cuenta la aplicación en la que se va a utilizar y las condiciones en las cuales operará nuestro sistema se define que el tipo de iluminación más adecuada es la Iluminación tipo Frontal.

En la Figura 56 se puede ver un esquema y un ejemplo de este tipo de iluminación.

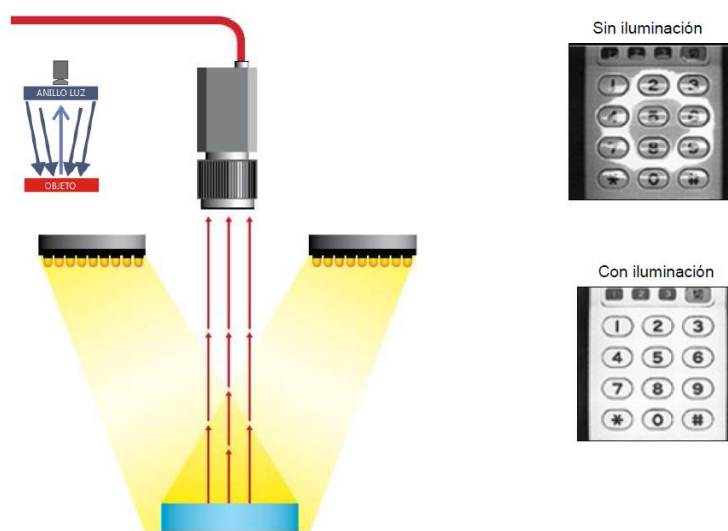


Figura 56 Iluminación tipo Frontal

Fuente: (Nogue & Antiga, 2012)

Una vez determinado el tipo de iluminación a utilizar se define la distancia adecuada del soporte de la cámara de tal manera que abarque un espacio de visión adecuado y un tiempo necesario para obtener la imagen y determinar colores, formas, etc. En la Figura 57 se observa el lugar y la distancia del extremo y al robot más cercano, de la cámara de visión. Dicha distancia es a 30 cm del extremo de la banda y a 60 cm al primer robot con una altura de 30 cm.

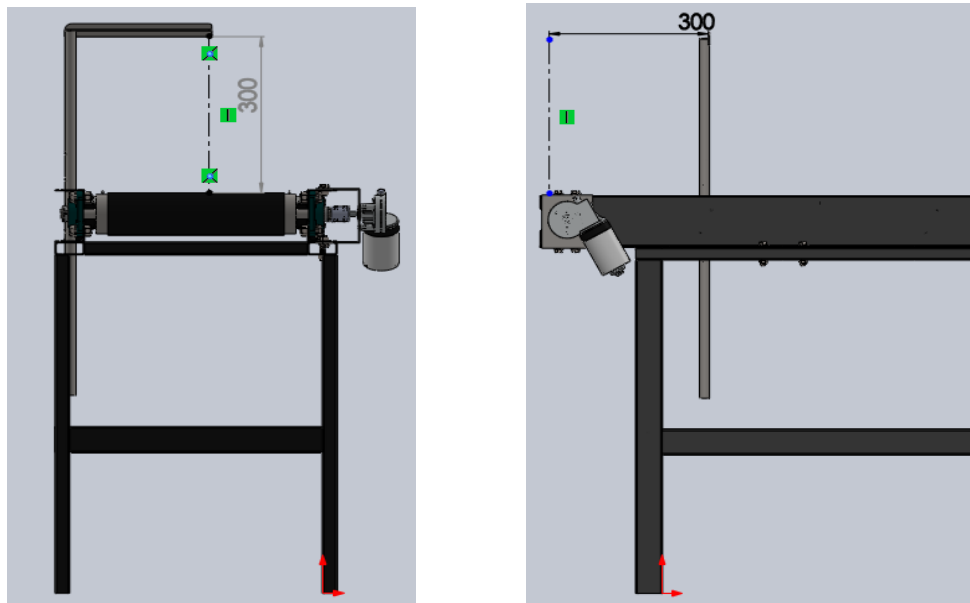


Figura 57 Ubicación cámara

3.5.2.1.2 Algoritmo de Visión de Artificial

El sistema deberá reconocer y diferenciar objetos en movimiento, y enviar la información a los robots para que éstos los clasifiquen de acuerdo a cada criterio.

Los colores que reconocerá el sistema son:

- Verde, azul y amarillo

Las formas que se reconocerán son:

- Triángulo, cuadrado y pentágono

Una vez realizado la detección ya sea de color o forma, el algoritmo determinará su centro de masa y obtendrá un punto de coordenadas el cual ira variando debido a que el objeto está en movimiento, finalmente tomara el último dato y lo enviará a la etapa del filtro de Kalman.



Figura 58 Piezas a clasificar

El algoritmo de visión desarrollado por (Montufar & Salazar, 2017), es el adecuado para el sistema ya que no tiene ninguna variación para el proceso de clasificación de la nueva celda de trabajo. Dicho algoritmo se detalla en el diagrama de flujo de la Figura 59.

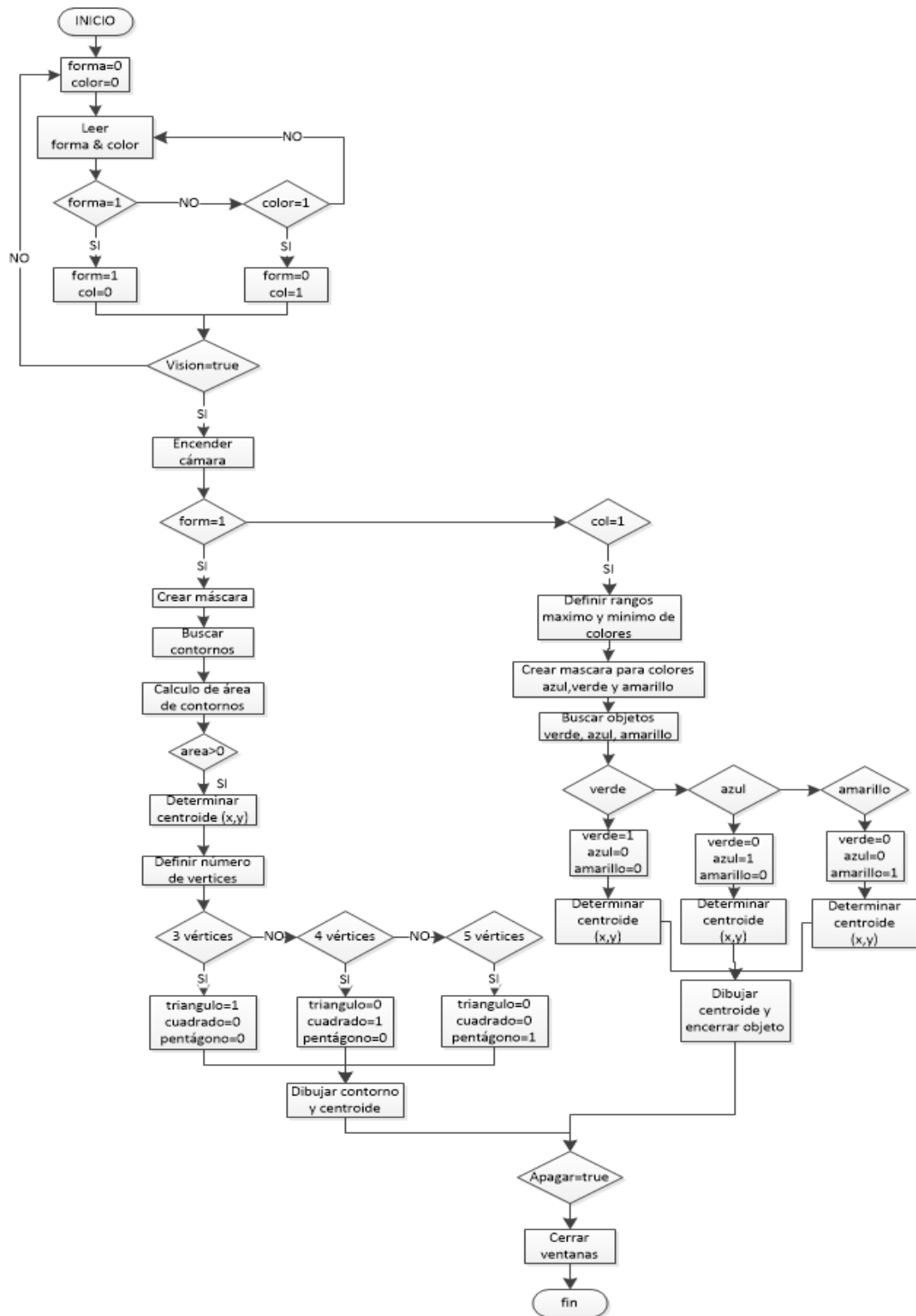


Figura 59 Algoritmo Visión Artificial

Fuente: (Montufar & Salazar, 2017)

3.5.2.2 Predicción de Posición de objetos

3.5.2.2.1 Modelamiento dinámico para el Filtro de Kalman

La posición de los objetos que van a ser clasificados por el robot, se determina mediante el filtro de Kalman el cuál realiza la predicción de la posición a la que estará el objeto y así el robot se ubique en dicha posición y lo clasifique. El dato que recibe el Filtro es el último punto captado por la visión artificial.

Para el proyecto el sistema lo representa el objeto en movimiento, por lo tanto se tiene como estados la posición del objeto en “ x ” y la velocidad del mismo la cual es constante y se tiene que es v

Entonces se tiene lo siguiente:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu + Q$$

$$Z = Hx + R$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.11 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H = [1 \quad 0]$$

En donde A es la matriz de transición teniendo un tiempo de muestreo de 0.11 seg. B es la matriz de control teniendo un valor nulo debido a que la velocidad es constante y H es la matriz de observación que nos da la posición del objeto. El vector de estado del objeto es

$$x_0 = \begin{bmatrix} x_i \\ v \end{bmatrix}$$

3.5.2.2.2 Algoritmo del Filtro Kalman

El desarrollo del algoritmo de Kalman propuesto por (Montufar & Salazar, 2017) se adapta de manera adecuada al proyecto sin embargo se debe añadir ciertas condiciones de estados de la celda para la selección de parámetros para el cálculo del filtro, de igual manera la velocidad se mantiene constante pero de diferente valor.

En la Figura 60 se detalla el algoritmo que será implementado.

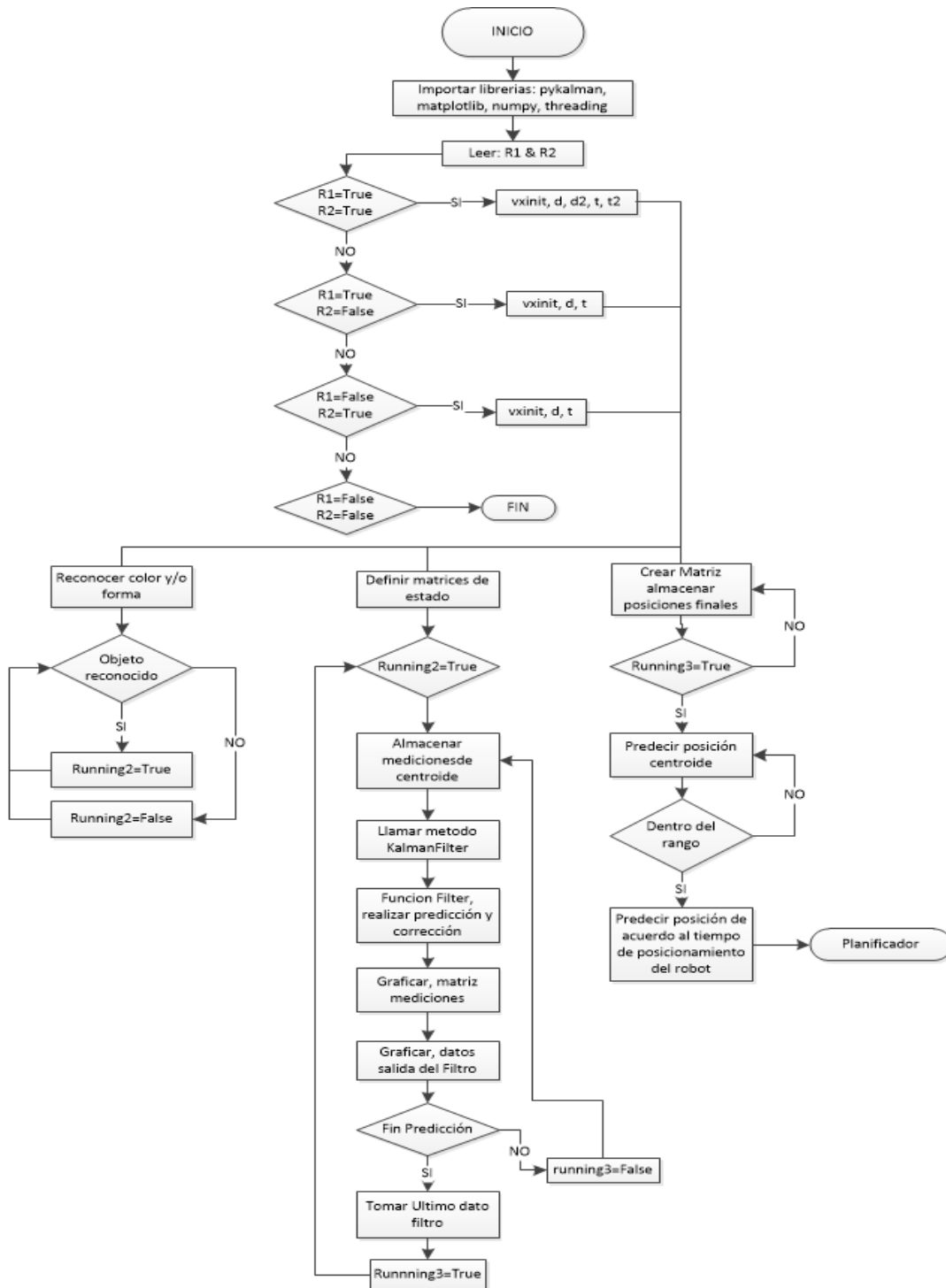


Figura 60 Algoritmo Filtro Kalman

3.5.3 Subsistema 4. Control Robots y Trabajo Colaborativo (Planificador)

3.5.3.1 Planificador de tareas

La parte más importante del sistema es el control de los manipuladores, las acciones que deben realizar cada uno de ellos frente a cada evento que se presente en la celda de trabajo, la toma de decisiones del planificador debe recibir lo siguiente: el estado de cada robot, es decir, si se encuentran o no disponibles para operar, una vez que se conoce dichos estados se requiere el dato enviado por la etapa de predicción (filtro de Kalman). El planificador desarrollado se muestra en la Figura 61.

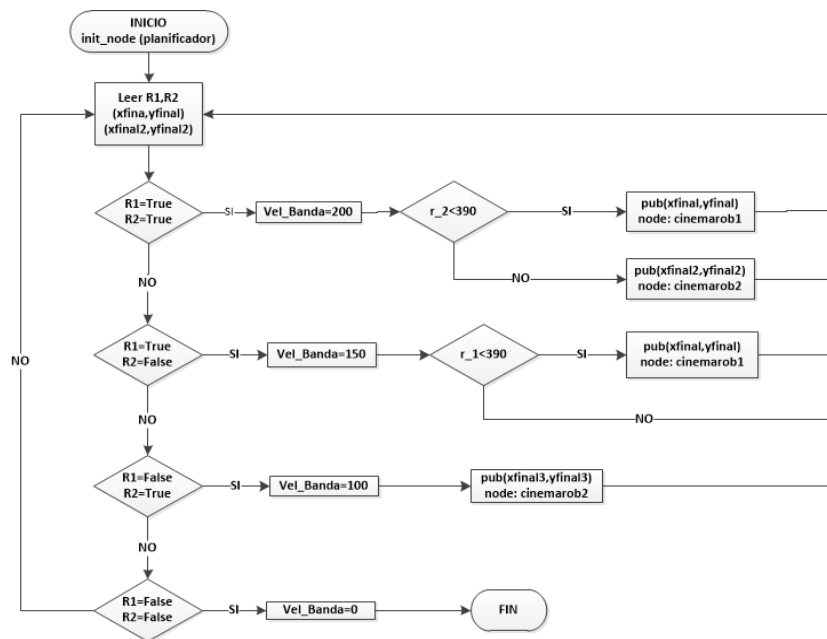


Figura 61 Diagrama Planificador

El planificador asignará la acción a un robot, mediante las siguientes condiciones:

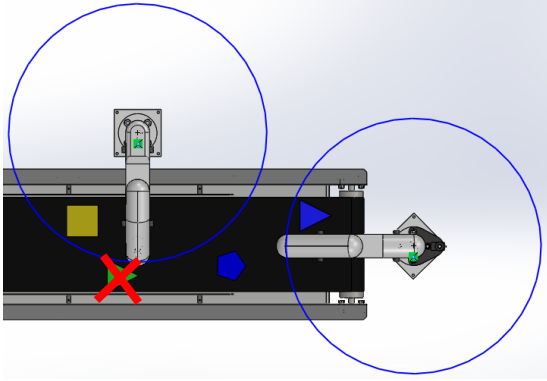
1. Robot 1 y robot 2 habilitados, el primer robot tomará los objetos que se encuentren en su rango de trabajo, caso contrario lo hará el segundo robot, en éste estado la velocidad de la banda será la máxima posible de manera constante.

Ocurre el caso de que se disponga de dos objetos muy cercanos entre sí y dentro del área de trabajo del primer robot, en dicho evento el planificador determinará que objeto tomará el primer robot mientras que el objeto restante lo tomara el segundo robot.

2. Robot 1 habilitado y robot 2 deshabilitado, en esta situación solo el robot 1 trabajará en la celda y tomará los objetos que se encuentre en su rango de trabajo a una velocidad constante v_1 cercana a la máxima ya que el robot 1 es de alta velocidad, si en un momento se tiene que los objetos están muy seguidos el planificador tomará el objeto más cercano.
3. Robot 1 deshabilitado y robot 2 habilitado, en esta situación únicamente el robot 2 trabaja en la celda con la diferencia que debido a la disposición del robot en la celda ésta podrá tomar cualquier objeto sin importar su posición, pero con una velocidad v_2 la cual es baja en relación a v_1 debido a que el robot 2 es el de menor velocidad.
4. Robot 1 y Robot 2 deshabilitados, la banda se detendrá completamente.

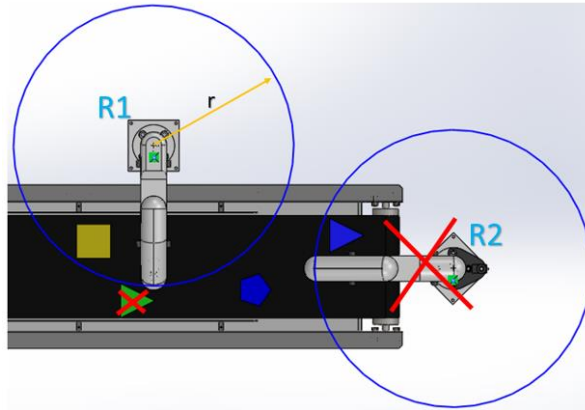
En la Tabla 31 se tiene un esquema de los 3 casos detallados anteriormente, en la cual se explica de manera gráfica el funcionamiento de los robots en cada caso.

Tabla 31
Esquemas de comportamiento de robots en la celda

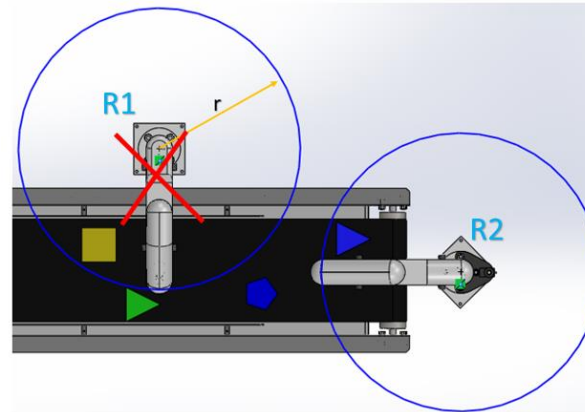
Estado	Esquema
Robot 1 y Robot 2 Habilitados R1 & R2 True	

CONTINÚA →

Robot 1 Habilitado,
Robot 2
deshabilitado
R1 True
R2 False



Robot 2 Habilitado,
Robot 1
deshabilitado
R2 True
R1 False



Una vez que el planificador ha determinado las acciones a tomar por los robots y conoce el estado actual de la celda, envía la información necesaria hacia el controlador central de la celda y esta hacia los robots para que realicen su trabajo.

Si en algún momento ocurre algún fallo fuera de los tomados en cuenta en el planificador, se deberá presionar el paro de emergencia del robot que ocasione el fallo, al ocurrir esto el planificador recibirá la señal y de esta manera seleccionara los parámetros adecuados dependiendo del caso.

Un diagrama posterior al planificador se muestra en la Figura 62.

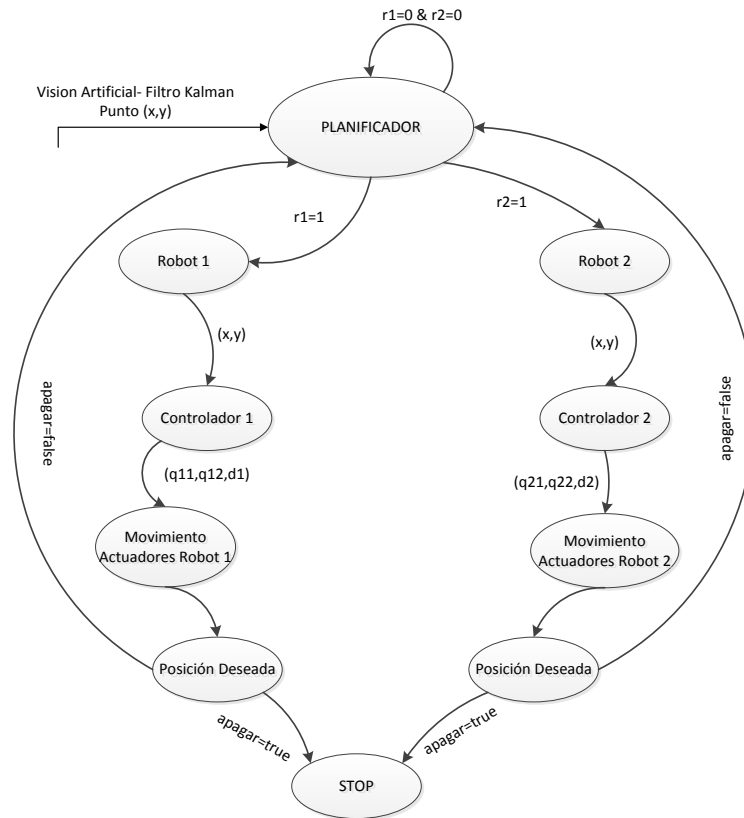


Figura 62 Diagrama de acción de cada robot.

El diagrama anterior muestra las acciones que toma cada robot una vez que ha recibido una tarea (posición), es decir toma el punto, lo envía a la cinemática inversa para su posicionamiento, después a los controladores de cada actuador para finalmente llegar a la posición deseada.

3.5.3.2 Posicionamiento de Robots

Una vez que el planificador ha determinado qué robot ha de realizar la clasificación del objeto actual inicia la etapa de posicionamiento del robot designado.

Para el posicionamiento de los robots SCARA, se parte de la cinemática del robot la cual se definió en la sección 3.1 y se repiten sus ecuaciones aquí, con dichas ecuaciones se determina las variables articulares para la posición del efector final del robot en el espacio. Dichas ecuaciones se

implementarán en un algoritmo de control, de tal manera que dicho algoritmo envía las instrucciones a los actuadores de los robots y se ubique en un punto dentro de su área de trabajo.

Las ecuaciones son:

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Py}{Px}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{Px^2 + Py^2 - 7900}{400\sqrt{Px^2 + Py^2}}\right)$$

$$q_2 = \cos^{-1}\left(\frac{Px^2 + Py^2 - 76100}{76000}\right)$$

$$d = 170 - Pz$$

Se puede ver que con las ecuaciones anteriores únicamente se requiere un punto en el espacio (x,y) el cual es proporcionado por el Filtro de Kalman a través del planificador de tareas, y de esta manera calcular las variables que deben tomar las articulaciones del robot con el fin de ubicarse en dicho punto.

El lazo de control de posicionamiento de los robots se muestra en la Figura 63.

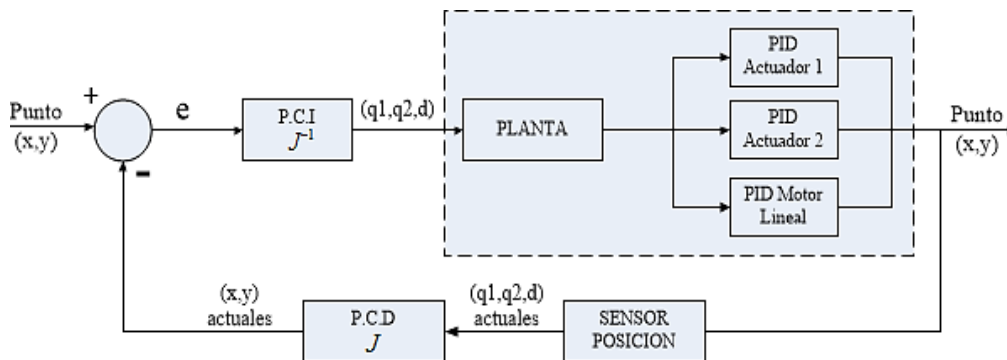


Figura 63 Lazo de Control Posicionamiento de Robots

Para la implementación de los controladores PID de los actuadores del robot de requiere obtener las funciones de transferencia de los mismos, las cuales se obtuvieron mediante el método de identificación, para la cual se tomó valores de entrada –salida, para la entrada se tomaron valores

de posición angular del eje del motor y como salida el voltaje entregado por el sensor de posición teniendo una cantidad adecuada de datos y mediante un software matemático se procedió a la estimación e identificación de las funciones de transferencia las cuales se detallan en la Tabla 36.

De igual forma se procedió al cálculo y diseño de los controladores para cada actuador obteniendo las constantes k_p , k_i y k_d las cuales se detallan en la Tabla 32

Tabla 32
Funciones Transferencia Actuadores Robot SCARA

Motor	Funciones Transferencia	Constantes K_p, K_i, K_d
Articulación 1	$\frac{47.5}{s^3 + 2.7s^2 + 44.8s + 2.11 \times 10^{-8}}$	$K_p = 16, K_d = 6.9,$ $K_i = 0.004$
Articulación 2	$\frac{51.1}{s^3 + 0.07s^2 + 1.8 \times 10^{-5}s + 4.11 \times 10^{-8}}$	$K_p = 16, K_d = 5.2,$ $K_i = 0.083$
Lineal	$\frac{-0.854}{s^3 + 3.7s^2 + 5.01s + 0.45}$	$K_p = 93, K_d = 3,$ $K_i = 16.2$

Resumen

Para cumplir las necesidades del proyecto se establecen las características técnicas que nos permitirán cumplir cada una de ellas. Para iniciar se tiene que la banda transportadora debe ser de mayor área de trabajo, velocidad y estructura resistente. De igual manera se tiene que el robot a construir debe ser de mayor velocidad con respecto al robot actual, posicionamiento relativamente exacto, etc. Sistema de Visión artificial no debe ser afectado por luz ambiente, reconocer colores y formas, entre otras características.

Dicho lo anterior para poder cumplir cada una de las necesidades, el proyecto de acuerdo al proceso de diseño se divide en módulos y subsistemas que son:

- Módulo 1. Robot SCARA Alta Velocidad
- Módulo 2. Celda Trabajo Colaborativo
- Módulo 3. Unidad de Control de la Celda de trabajo

Se inicia con el diseño del robot SCARA de alta velocidad, se realiza el estudio cinemático obteniendo las ecuaciones para su posicionamiento, posteriormente se realiza el estudio dinámico para establecer las cargas mínimas y máximas que soportará cada articulación del robot, teniendo en cuenta material de los eslabones y objetos a mover. Establecidos los valores de torques y fuerzas máximas en el robot, se procede a la elección de los actuadores adecuados (motores), teniendo en cuenta el torque máximo y la velocidad a la que se requiere que se mueva. Finalmente se realiza el diseño CAD de la geometría (forma) del robot acorde a la aplicación.

El diseño de la banda transportadora parte teniendo en cuenta ciertos parámetros iniciales que se requieren para su funcionamiento como son longitud total de 1,80 m y velocidad mayor a 0.05 m/s. Con las especificaciones previas se procede a diseñar la banda de acuerdo a la norma CEMA y con la ayuda del manual de (DUNLOP, 2009), se obtiene parámetros mediante cálculos y fórmulas establecidas, como son fuerzas y potencias, con estos valores la elección y dimensionamiento de los distintos elementos a utilizar en la banda como son motor, rodillos, ejes de rodillos, chumaceras, siguiendo las recomendaciones de distintos fabricantes.

Para la unidad de control de la celda de trabajo, se parte de la elección del tipo de controlador a utilizar teniendo en cuenta la cantidad de salidas PWM, velocidad de transmisión de datos y costo.

En el subsistema de Visión artificial y Predicción de posición se realiza primero la selección del tipo de iluminación más adecuada con el fin de evitar ruidos producidos por la luz del ambiente, se realiza pruebas y se define la altura y posición en la banda de la cámara. Para el Filtro de Kalman se calculan las matrices que actúan en el algoritmo, posteriormente se definen los parámetros que actúan en el cálculo del filtro y se aplica el algoritmo desarrollado por (Montufar & Salazar, 2017) teniendo en cuenta los cambios pertinentes en el proyecto.

Finalmente se desarrolla la parte del planificador de tareas el cual asignará a un determinado robot la tarea de clasificación con el fin de aumentar la producción. Al determinar el robot que realizará la tarea, se procede al posicionamiento de los mismos para lo cual se establece un lazo de control el cual consta de la cinemática inversa la cual definirá las variables articulares para cada actuador de los robots y un control de posición para cada articulación.

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En el capítulo 4 se detalla todo el proceso de construcción e implementación de la celda de trabajo, iniciando con la construcción de la banda transportadora, posteriormente con la construcción y ensamblaje del robot SCARA de alta velocidad y la instalación de un panel de control, finalmente las pruebas y resultados del funcionamiento total de la celda, analizando errores y posibles correcciones a la misma.

4.1 Construcción de la Banda Transportadora

Para la banda transportadora se tiene que el material para la estructura es ACERO A36 en la forma de tubo rectangular de 25x50 mm con un espesor de 2 mm, y un perfil en C de 50x100 mm y espesor de 2 mm. Toda la construcción de la estructura se realizó en el laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, aprovechando las maquinas disponibles.

Se cortó y perforó cada elemento de la banda de acuerdo a las especificaciones dadas en los planos. (Ver Figura 64)



Figura 64 Corte de tubos de acero

Una vez que se cortaron las piezas y se realizaron las perforaciones, se procedió a ensamblar la banda, se realizó primero una soldadura únicamente con puntos de soldadura para realizar las pruebas necesarias, es decir, que soporte las cargas y movimiento de la banda, una vez comprobado que la estructura está bien cuadrada y diseñada se procedió a la soldadura final y a pintarla. Ver Figura 65.

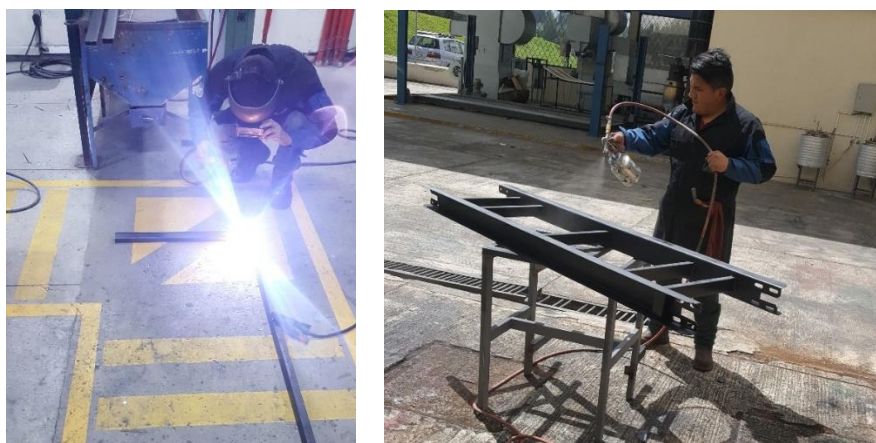


Figura 65 Soldadura y pintura de la estructura

4.2 Construcción y ensamble del Robot SCARA de alta velocidad

4.2.1 Eslabones

Los eslabones para el robot, se los obtuvo mediante corte por plasma de acuerdo a las dimensiones dadas en los planos (Ver Anexos), las perforaciones para los pernos se realizó en el laboratorio de procesos de manufactura. Ver Figura 66.



Figura 66 Eslabones Robot SCARA

4.2.2 Acoples para motores

Para las articulaciones se necesitaron ciertos acoples, los cuales aquellos en los que actuaran las mayores fuerzas se las manufacturo en acero A36 mientras que los menos importantes, es decir, los que servirán de guías se las fabrico en duralon.

Los resultados se muestran en la Figura 67.

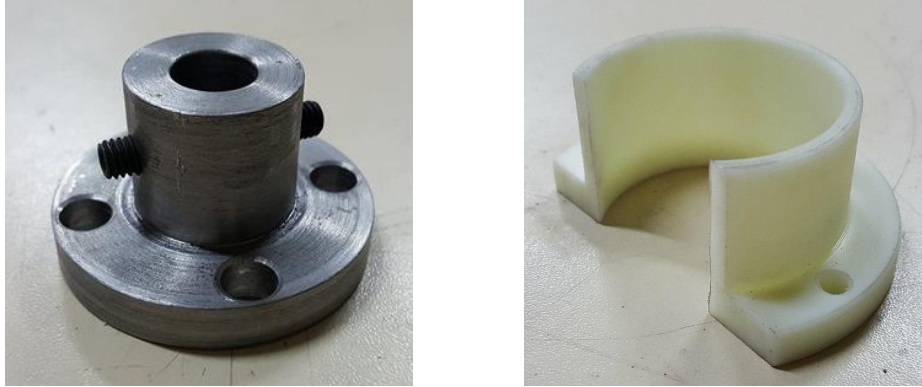


Figura 67 Acoples Motor

4.2.3 Estructura externa del robot SCARA

La estructura del robot se construyó tratando de que sea lo más liviano posible, de tal manera que no aumente el peso total y el motor soporte la menor carga, es por tal motivo se construyó con láminas de tool de 1 mm de espesor, dándole la forma y dimensiones que se detallan en los planos, en la Figura 68 se observa los tres elementos.

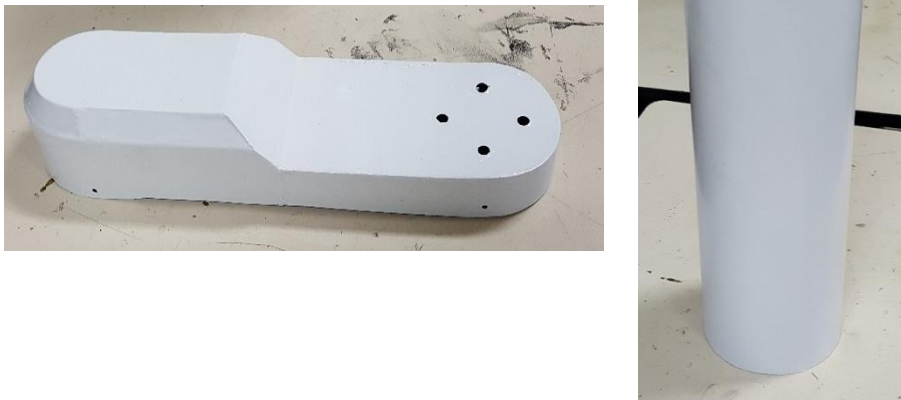


Figura 68 Estructura Externa Robot

4.2.4 Ensamble y Montaje del robot SCARA

Una vez obtenido los elementos maquinados y la estructura externa de acuerdo a las especificaciones dadas en el diseño CAD, procedemos a ensamblar la estructura interna del robot. En las Figura 69 se observa el ensamble de la estructura interna de la base del robot.

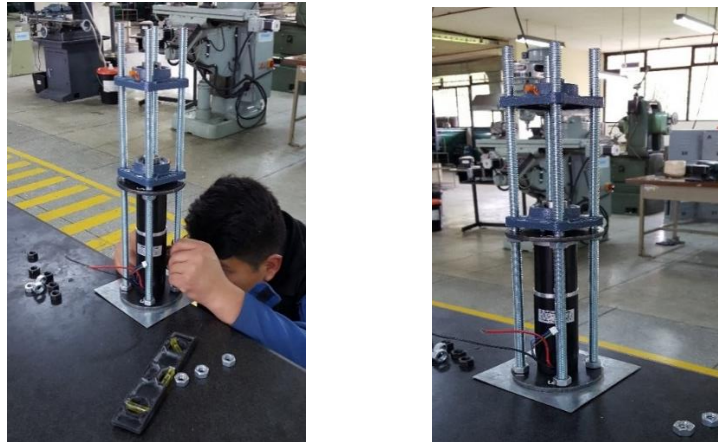


Figura 69 Ensamble Robot SCARA

Una vez que se ensambla la base del robot se procede a fijarla en la mesa, para posteriormente montar el primer eslabón. Ver Figura 70

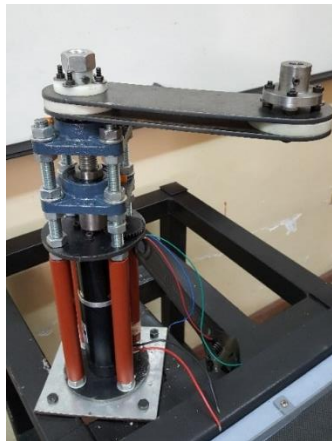


Figura 70 Base fija robot SCARA

Para terminar se procede a colocar el último eslabón, el cual contiene el actuador lineal para su efector final. En la Figura 71 se tiene la posición de los motores en el eslabón

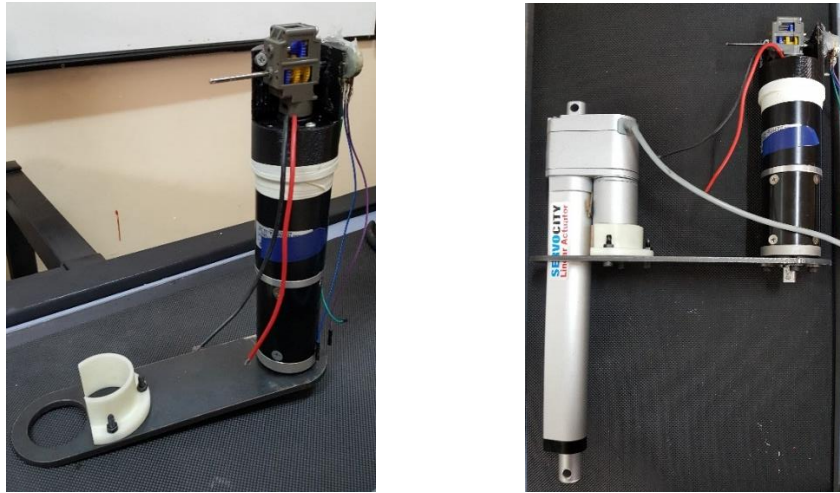


Figura 71 Montaje articulación prismática robot SCARA

En la Figura 72 se muestra el montaje final del robot, fijo en la mesa.

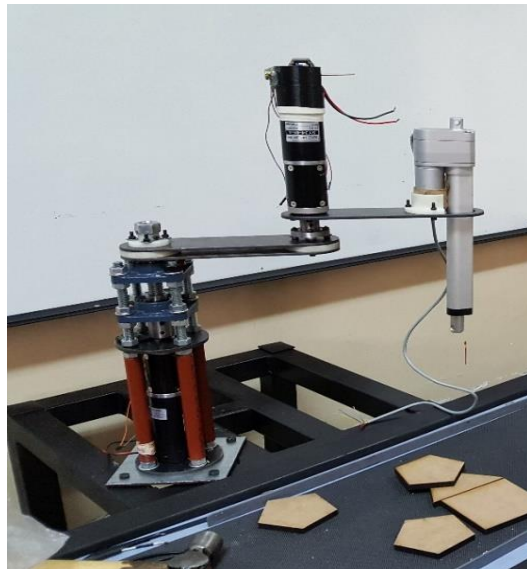


Figura 72 Montaje final robot SCARA

Construidos los dos robots SCARA y la banda transportadora se procede al diseño final de la banda, es decir, disposición de los robots en la celda, dimensiones.

4.3 Diseño final de la celda robotizada

4.3.1 Dimensiones de la celda

Las dimensiones de la celda son 2400 x 1504,91 x 1030 en la Figura

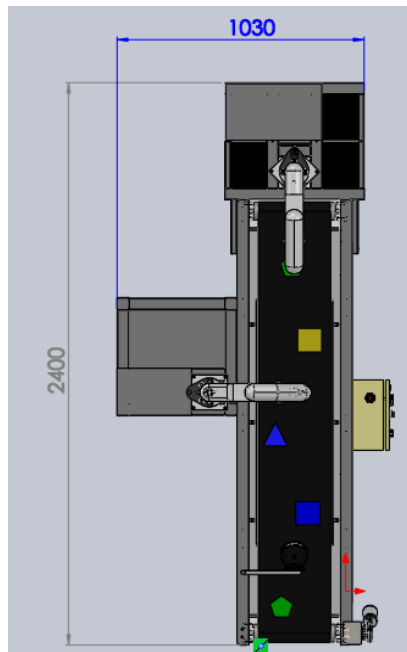


Figura 73 Dimensiones de la celda de trabajo

4.3.2 Disposición de la celda de trabajo y ubicación de los robots

La celda de trabajo diseñada es de tipo *no atendida*, la disposición de la celda de trabajo será *en línea*, la ubicación de los robots de igual manera será *en línea*

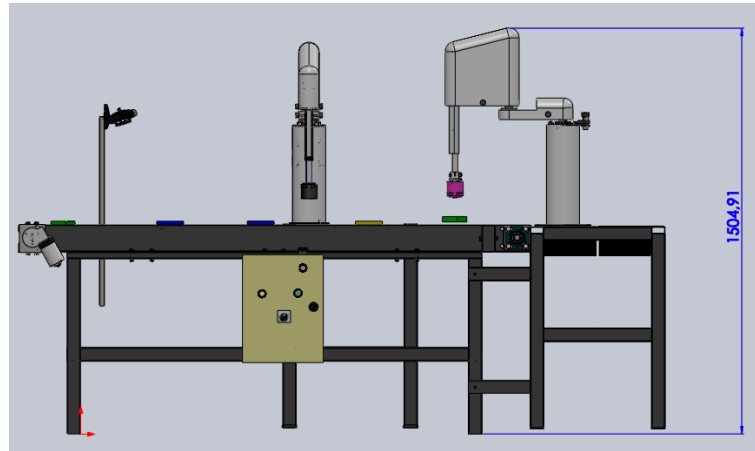


Figura 74 Disposición de la celda de trabajo y ubicación de los robots

Finalmente en la Figura 75 se puede observar el concepto final de la celda de trabajo, el cual consta de los dos robots SCARA, banda transportadora y un sistema de visión de artificial.



Figura 75 Celda de Trabajo Final

4.4 Montaje del Tablero

Una vez que se tiene lista la parte mecánica de la celda, se procede al montaje del tablero electrónico, en el cual se colocaron los diferentes elementos de una manera ordenada, con el fin de evitar posibles inconvenientes al momento de reemplazar los elementos que a futuro puedan averiarse y para evitar posibles interferencias en las lecturas de las señales.

En la Figura 76 se observa el montaje final del tablero de control de la celda de trabajo.

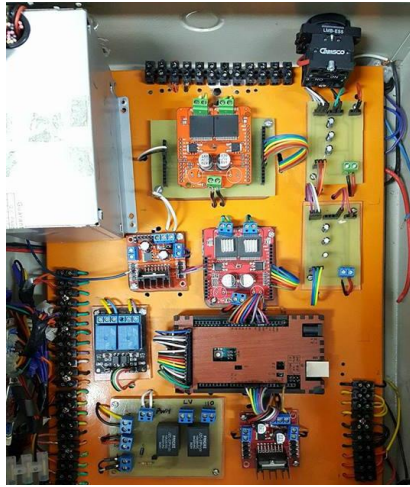


Figura 76 Tablero de control

4.5 Sistema Visión Artificial, Calibración de colores y reconocimiento de formas

En el sistema de visión artificial se realizó una calibración de colores, es decir, se determinó el rango de valores HSV para cada color que detectara el sistema, se determinó rangos mínimos y máximos con el objetivo de obtener valores adecuados y así evitar que el sistema reconozca erróneamente los colores. De igual manera se calibro para el reconocimiento de contornos y vértices para cuando esté en la opción de reconocer formas. Previamente se realizó la calibración para obtener el punto de coordenadas real del centro de masa. En las Figura 77 se pueden observar los resultados.

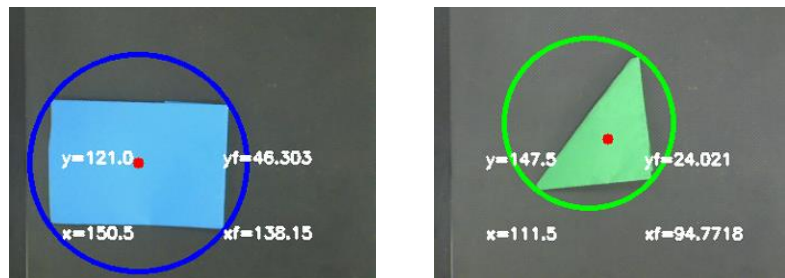


Figura 77 Pruebas reconocimiento de colores y formas

4.6 Programación Celda de Trabajo

4.6.1 Programación ROS, mensajería, Publicador-Suscriptor

Para la implementación del planificador como se indicó anteriormente se requiere como datos de entrada, la posición del objeto que la proporciona el algoritmo de Kalman, lo cual se realizara mediante comunicación entre nodos, a través de mensajería Publicador-Suscriptor en el entorno ROS (Robot Operating System), de esta manera tener un único código o nodo que se encargará de determinar las acciones a tomar.

4.6.2 Archivo de mensajes (.msg)

Se crea un archivo .msg, dentro de nuestro archivo se encuentran detallado todos los mensajes que se enviarán y el tipo de mensaje. Nuestro archivo consta de los siguientes mensajes Ver Figura 78.

```
int64 numx1
int64 numy1
int64 numx2
int64 numy2
int64 numr1
int64 numr2
int64 numcla
```

Figura 78 Archivo .msg

En un archivo “.msg” como se observa se indica el tipo de dato “int64” seguido del nombre que se le dará al mensaje.

4.6.3 Publicador-Suscriptor

Como su nombre lo indica este método de mensajería, un nodo será el publicador, es decir, el que enviará el mensaje al siguiente nodo, el cual será el nodo suscriptor que recibirá el mensaje del nodo anterior. Dichos nodos se comunicaran a través de un “topic” que es el medio de conexión entre nodos.

A continuación se muestra la línea de código tanto para publicador y suscriptor

Publicador:

```
pub=rospy.Publisher( "topic" , msg_name)
pub.publish(data_1,data_2,...)
```

Subscriber:

```
rospy.Subscriber( "topic_publicador" , msg_name, funcion_de_llamada)
```

Llamada nodo subscriber:

```
def funcion_de_llamada(data)

    data1=data.data_name1
    data2=data.data_name2
```

Se puede ver que tanto nodo publicador como subscriber debe tener en común el mismo “topic” para que exista comunicación entre ellos, y se debe declarar el tipo de mensaje a enviar. Se tiene también en cuenta la forma de llamar a cada mensaje y asignarlo a una variable diferente.

En la Figura 79 se tiene el diagrama final de todos los nodos del sistema.

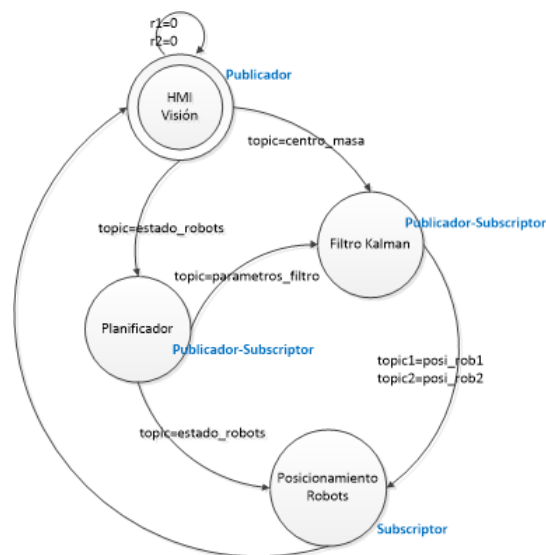


Figura 79 Diagrama de nodos, Celda de trabajo

Como se puede ver consta de un nodo principal el cual se denomina “principal” en dicho nodo se encuentra la programación de la HMI, visión artificial (reconocimiento de colores y formas) y el algoritmo del Filtro de Kalman, éste se conecta con el siguiente nodo llamado “planificador” en el cual se encuentra programado el planificador que se detalló en la Figura 61; posteriormente el nodo “planificador” se conecta a dos nodos independientes los cuales se denominan “cinamerob1” y “cinemarob2” en los que se encuentra el algoritmo, cálculos de la cinemática inversa de cada robot para finalmente enviar las variables articulares hacia la tarjeta de control para el posicionamiento de cada robot de acuerdo al caso.

4.7 Pruebas de Funcionamiento

Realizado la construcción de cada parte de la celda de trabajo, se procede a ejecutar pruebas de funcionamiento de cada una de ellas, con el fin de comprobar su correcto funcionamiento y que el diseño desarrollado fue correcto.

4.7.1 Pruebas posicionamiento robot SCARA

Para las pruebas del robot SCARA construido se realizará las pruebas de posicionamiento para lo cual se ingresara varios puntos (x,y,z) de prueba en una HMI sencilla (Ver Figura 80) de tal manera que el robot se posicione en dicho punto, posteriormente se tomara medidas de los sensores de posición para conocer la posición real del robot, y con dichos valores se sacara el error de posicionamiento del robot y determinar que el mismo cumple con las especificaciones adecuadas para la aplicación. En la Tabla 33 se muestra los puntos ingresados, ángulos calculados, ángulos reales y el error de posicionamiento.

Figura 80 Pruebas posicionamiento robot SCARA

Como se observa en la Figura 80 se ingresa un punto de coordenadas, el algoritmo de la cinemática del robot calcula las variables articulares q_1 , q_2 , d y las muestra en el lado derecho.

Tabla 33

Prueba posicionamiento robot SCARA

Pto. (x,y)mm	Pto. (x,y) mm
Teórico	Real
(150,320)	(155,324)
(-100,100)	(-107,103)
(100,100)	(95,105)
(90,110)	(90,105)
(-110,-120)	(-115,-128)
(-300,0)	(-296,0)
(200,200)	(193,195)
(140,140)	(145,133)
(-130,-140)	(-127,-146)

En la tabla anterior se puede observar los datos de los puntos teóricos requeridos y los obtenidos mediante lectura de los sensores de posición, que como se puede apreciar se tiene un error promedio de $\pm 5\text{mm}$ aproximadamente por lo que al estar en milímetros se puede aceptar dicho posicionamiento.

Una vez que se ha realizado la construcción del robot y sus respectivas pruebas de funcionamiento en la Tabla 34 se detalla las características de los dos robots.

Tabla 34
Características técnicas de los robots SCARA

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIÓN	
	ROBOT 1	ROBOT 2
Alcance (mm)	390 mm	400 mm
Numero de ejes	3	3
Repetibilidad	$<\pm 0.015$ mm	$< \pm 0.1$ mm
Peso	10 kg aprox.	20 kg aprox.
Posición de Montaje	Sobre suelo.	Sobre suelo
Controlador	AVR – ATMEGA 2560.	AVR – UNO
Velocidad		
Eje X	82rpm	67rpm
Eje Y	82rpm	67rpm
Eje Z	10 m/s	10 m/s
Movimientos		
Eje X:	200 °	200°
Eje Y:	200 °	200°
Eje Z:	0 – 200 mm	0 – 150 mm
Posición inicial	HOME (incluye)	No Incluye
Efecto final	Electroimán (incluye)	Electroimán (incluye)
Retroalimentación	Encoders ópticos incrementales en los motores para ejes X e Y, 500 pulsos/rev. Señales desfasadas 90°, entradas 5 Vcd, 40 ^a (HP, HEDS - 9100)	Encoders ópticos incrementales en los motores para ejes X e Y, 400 pulsos/rev. Señales desfasadas 90°, entradas 5 Vcd, 40A (HP, HEDS - 9100)
Actuadores		
Eje X - Y:	Motores DC, 24 VDC – 3.85A, (IG 52-04, TD-045-082)	Motores DC, 24 VDC – 3.85A, (IG 52-04, TD-020-067)
Eje Z:	Motor DC 12 VDC – 0.8 A (ROBOTZONE HDA 8-2)	Motor DC 12 VDC – 0.8 A (ROBOTZONE HDA 8-2)
Reducción		
Eje X:	1:43	1:53
Eje Y:	1:43	1:53
Eje Z:	1:5	1:5
Transmisión de Potencia	Directa	Directa
Carga máxima	5 Kg	2 kg
Dimensiones	463,68 x 676,30 x 120	508,94 x 733 x 125

4.7.2 Prueba de funcionamiento planificador de tareas

Una vez que se desarrolló la programación del planificador se procedió a realizar pruebas, variando los estados de los robots (si están o no habilitados), obteniendo un funcionamiento aparentemente correcto de acuerdo a los estados y acciones que se detallaron anteriormente. En la Figura 81 se puede observar el funcionamiento del nodo del planificador de tareas.

```
x=311  
y=-102  
x2=-141  
y2=452  
banda255  
rob2  
x=309  
y=24  
x2=-143  
y2=325  
banda255  
rob1
```

Figura 81 Funcionamiento Planificador

La Figura 81 nos muestra 6 líneas las cuatro primeras líneas representan las posiciones obtenidas por la predicción del objeto, es decir, al punto donde deben ir el robot 1 o robot 2 de acuerdo a su sistema de coordenadas, la siguiente línea representa el valor PWM que se le entrega al motor de la banda, dicho en otras palabras se refiere a la velocidad de la banda la cual cambia dependiendo del estado de la celda finalmente la última línea representa que robot ejecutara la acción determinado por el planificador.

4.7.3 Prueba funcionamiento celda de trabajo

Comprobado el correcto funcionamiento del planificador, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento de la celda de trabajo en su totalidad, y así determinar posibles errores en funcionamiento, calibraciones, etc. Ver Figura 82



Figura 82 Funcionamiento celda de trabajo, reconocimiento de colores

En la Figura 82 se puede ver el funcionamiento del HMI de la celda de trabajo. Se puede observar en este caso que la celda de trabajo puede reconocer tres colores al mismo tiempo y determinar su ubicación en el área de visión y posteriormente predecir su posición en la banda.

De igual manera en la Figura 83 se observa el reconocimiento de las diferentes formas, que de igual manera el planificador determinará que objeto tomara un robot determinado.



Figura 83 Reconocimiento de formas

4.8 Protocolo de Pruebas para la Celda de Trabajo

Al momento de realizar las pruebas se debe tomar en consideración los siguientes factores:

- Tiempo de posicionamiento de cada robot
- Velocidad de la banda en cada estado
- Distancia desde el punto de partida, hasta área de trabajo de cada robot
- Tiempo de envío de piezas para cada estado.

Una vez iniciado el sistema tal y como se indica en el manual de operación Anexo D, se tiene los siguientes estados los cuales se detallaron en la sección 3.5.4.1:

- a) Dos robots disponibles
- b) R1 disponible
- c) R2 disponible

Para cada caso se debe cumplir las especificaciones de funcionamiento, ya que podrían ocurrir errores en el envío de datos, posicionamiento, etc.

Para el caso (a) se tiene:

- Velocidad de banda es 0.1 m/s
- Tiempo de envío de piezas 4.5 seg.

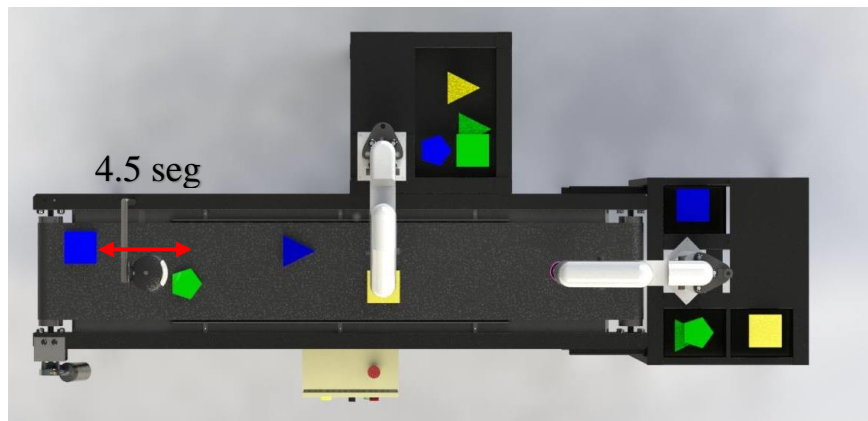


Figura 84 Clasificación de productos estado (a)

Para el caso (b) se tiene:

- Velocidad de banda 0.1 m/s
- Tiempo de envío de piezas 7 seg

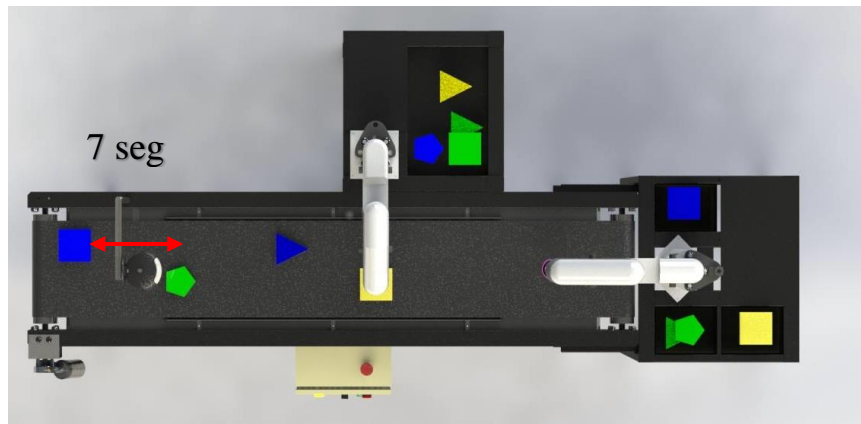


Figura 85 Clasificación de productos estado (b)

Para el caso (c) se tiene:

- Velocidad de banda 0.07 m/s
- Tiempo de envío de piezas 8 seg

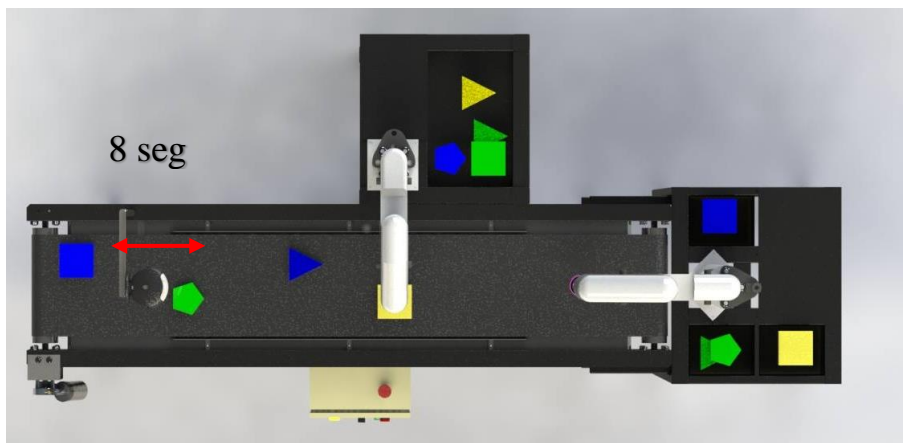


Figura 86 Clasificación de productos estado (c)

4.9 Análisis de resultados al implementar trabajo colaborativo en una línea de producción.

4.9.1 Análisis de tiempos de proceso

Al realizar una mejora en un proceso industrial, se debe realizar una comparación entre su rendimiento anterior y el actual al implementarse dicha mejora. Para lo cual se procedió a tomar datos de producción.

Primero se va realizar pruebas a cada robot trabajando por separado y los dos trabajando en conjunto, tomando datos de la cantidad de piezas que clasificará en un determinado tiempo, al final se obtendrá una media de dichos datos para al final compararlos y determinar si el robot diseñado tendrá un mejor rendimiento que el existente.

Se realizó diez pruebas con 12 piezas tomando el tiempo en que le toma realizar la clasificación de todas ellas.

Tabla 35
Tiempos de Clasificación

Prueba	Robot 1	Robot 2	Robot 1 & Robot
	Tiempo [seg]	Tiempo [seg]	2 Tiempo [seg]
1	76.7	105.4	55.0
2	76.0	104.8	54.9
3	76.4	106.1	55.7
4	76.3	105.6	55.8
5	75.8	105.5	55.3
6	76.2	105.0	56.2
7	76.1	105.2	55.7
8	76.6	105.6	55.3
9	75.6	105.3	55.1
10	76.0	105.5	55.2
\bar{t}	76.17	105.4	55.42
S	0.34	0.36	0.41

Se tiene que en promedio para clasificar 12 piezas el primer robot toma un tiempo de 76.17 seg (1.27 min), el segundo de 105.4 seg (1.76 min) y en conjunto 55.42 seg (0.92 min). Para tener una apreciación más aproximada a una industria se realiza el cálculo para un día laboral de 8 horas (480 min). Se tiene que la *Capacidad de Diseño* (c_d) es:

$$(480 \div 1.27)12 = 4535.43 \approx 4535 \text{ piezas}$$

Para calcular la *capacidad efectiva* (c_e) se tiene:

$$c_e = \#unidades * 0.85$$

Donde 0.85 se refiere al 85% de trabajo real, por tanto la capacidad efectiva es:

$$4535 * 0.85 = 3854 \text{ piezas}$$

En la vida práctica se dice que dicho valor es si toda la producción se realiza de forma normal, pero ya en datos reales pueden ocurrir paros de maquinaria, accidentes de operarios, cortes de energía, etc. Por lo que al valor anterior se le añade un porcentaje que se refiere a dichos sucesos, el cual se obtiene basado en registros diarios de producción. Para nuestro proyecto se utilizará un porcentaje de 83% por lo que la *producción real* (p_r) será: (Betancourt, 2016)

$$3854 \cdot 0.83 = 3199$$

De igual manera se realiza el cálculo para el segundo robot teniendo los siguientes resultados:

$$c_d = 3420 \text{ piezas}$$

$$c_e = 2907 \text{ piezas}$$

$$p_r = 2412 \text{ piezas}$$

Para concluir se realiza el mismo cálculo para la celda cuando los dos robots se encuentran habilitados obteniendo lo siguiente:

$$c_d = 6264 \text{ piezas}$$

$$c_e = 5324 \text{ piezas}$$

$$p_r = 4419 \text{ piezas}$$

Finalmente con el tiempo total que le toma a la celda realizar la clasificación de 12 piezas el cual es 0.92 min se realizó una prueba con 100 piezas dándonos un tiempo de 7.8 min, se procede a determinar la tasa de producción de la celda de trabajo obteniendo los siguiente.

$$t_p = \frac{\#piezas}{tiempo\ clasificación}$$

$$t_p = 12.82\ piezas/min$$

Con los resultados anteriores se puede observar dos aspectos:

- El robot diseñado tiene una eficiencia de producción mayor al robot anterior, esto debido a que se rediseño el mismo con la finalidad de aumentar su velocidad de operación, obteniendo un aumento del 32.63% con respecto al anterior trabajando por separado.
- Al integrar el robot diseñado a la línea de producción de clasificación de productos de tal manera que operen en conjunto entre los dos robots se obtiene un aumento de producción del 83.21%, por lo que se verifica el objetivo principal de nuestro trabajo el cual fue obtener una ventaja en producción y tiempos al añadir trabajo colaborativo entre dos robots en una estación de trabajo.

4.9.2 Análisis de Rendimiento de la celda de trabajo

Otro aspecto importante que se debe analizar es el rendimiento de toda la celda al haberla añadido un segundo robot. Para lo cual se debe calcular por separado el rendimiento de cada robot al realizar su tarea. Para el cálculo del rendimiento de cada robot se tiene la siguiente ecuación:

$$Y = e^{-DPU} \quad (4.1)$$

Donde:

Y: Yield (Rendimiento)

$$DPU = \frac{D}{U}$$

D: Defectos U: Unidades

Los defectos (D) se refieren a posibles fallas en el proceso, en nuestro caso los posibles defectos podrían ser objetos que no sean reconocidos por el sistema de visión artificial y objetos que el robot no logre clasificar.

Se realizaron diez pruebas a la celda con 100 piezas en total a clasificar teniendo los siguientes resultados.

Tabla 36
Rendimiento de los Robots

Prueba	Defectos Robot1	Robot 1 Y [%]	Defectos Robot2	Robot 2 Y [%]
1	2	98.01	2	98.01
2	1	99.00	1	99.00
3	3	97.05	4	96.07
4	0	100.00	0	100.00
5	1	99.00	2	98.01
6	0	100.00	4	96.07
7	1	99.00	2	98.01
8	0	100.00	2	98.01
9	3	97.05	3	97.05
10	0	97.05	1	99.00
\bar{Y}		98.61		97.92
s		1.24		1.26

s=desviación estándar

Para calcular el rendimiento total de la celda se tiene la ecuación:

$$Y_t = \prod_{i=1}^n Y_i \quad (4.2)$$

$$Y_t = 0.9861 * 0.9792 = 0.9655$$

$$Y_t = 96.55\%$$

Por tanto se tiene que el rendimiento en conjunto de los robots SCARA para el proceso de clasificación de productos es de 96.55%, asumiendo que se opera 8 horas diarias.

Con el valor obtenido se obtiene la probabilidad de que en un turno normal de trabajo ocurran fallas o defectos:

$$P(d) = 1 - Y_t \quad (4.3)$$

$$P(d) = 1 - 0.9655$$

$$P(d) = 0.0345 = 3.45\%$$

Resumen

Para el diseño y la construcción de la celda robotizada, se lo hizo mediante diferentes etapas. Una vez realizado el diseño y respectivas simulaciones se construye y ensambla primero el robot SCARA, posteriormente se ejecuta pruebas de funcionamiento del mismo tomando en consideración principalmente su exactitud al posicionarse en un determinado punto en el espacio. Adicional en esta etapa se realiza un mantenimiento correctivo al robot que se encontraba habilitado.

Después se realiza la construcción total de la nueva banda transportadora con sus nuevas características, distancia, velocidad. Se instala el motor y el tablero general de control de la celda y se realizan pruebas de funcionamiento de cada uno de los elementos mecánicos de la banda, verificando que estos no fallen al estar la banda en funcionamiento. De igual manera se verifica el funcionamiento de los elementos electrónicos en el tablero.

Teniendo toda la parte física lista y en perfecto funcionamiento, se procede a la implementación del algoritmo de visión artificial en conjunto con el algoritmo del filtro de Kalman, para finalmente implementar el controlador general de la celda de trabajo (planificador). Realizando pruebas en cada uno de los estados posibles de la celda, verificando que se asigne los parámetros para cada situación y su perfecto desempeño al momento poner en marcha la celda de trabajo.

Finalmente se hace un análisis de resultados teniendo en cuenta las ventajas al aplicar trabajo colaborativo en un determinado proceso industrial, en nuestro caso se realizó un análisis de aumento de producción y rendimiento en el proceso con respecto al estado inicial de la celda de trabajo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

- Se implementó una celda de trabajo para clasificación de productos, mediante el trabajo colaborativo de dos robots SCARA, la cual consta de un planificador de tareas que se encarga de coordinar y asignar las acciones en cada estado de la celda de trabajo, sistema de visión artificial para la detección y reconocimiento de objetos, una banda transportadora que se encarga de trasladar los objetos hacia las áreas de trabajo de cada robot para su posterior clasificación.
- Se diseñó y construyó un robot SCARA de mayor velocidad, con sus respectivos controladores de posición para cada articulación, los cuales mediante un lazo de control cerrado a través del error proporcionado por el sensor nos asegura que la articulación deberá llegar al punto deseado.
- Se utilizó como material para sus eslabones aluminio, con el fin de obtener la menor deformación. Como actuadores se utilizaron motores DC 24V 82 RPM, 33 kgf, los cuales se seleccionaron de acuerdo a los resultados del estudio dinámico del robot SCARA.
- Se implementó el filtro de Kalman a modo de predictor de posición de los objetos presentes en la banda que han sido captados por la cámara, los parámetros del filtro fueron determinados por un planificador el cual dependiendo del estado actual de la celda de trabajo asignara las variables del filtro.
- Se realizó el diseño e implementación de un planificador central para el control total del sistema, definiendo diferentes estados de la celda con sus respectivas transiciones y acciones frente a cada uno de ellos, teniendo como resultado un funcionamiento adecuado al momento de realizar las pruebas finales de la celda con cada estado definido.

- Se realizó una programación modular a través del ambiente de programación Python en conjunto con Robotic Operating System (ROS), realizando cada etapa del sistema en nodos, cuya comunicación se realizó a través de mensajería publicador/subscriptor, de tal manera que se pueda supervisar el funcionamiento de cada etapa de la celda de trabajo
- Se diseñó y construyó una celda robotizada la cual tiene una eficiencia de 96.55% para la clasificación de productos, en donde se obtuvo un aumento de producción del 83% en relación a la celda anterior la cual constaba de un solo robot, y con una tasa de producción de 12.8piezas/min.

5.2 Recomendaciones

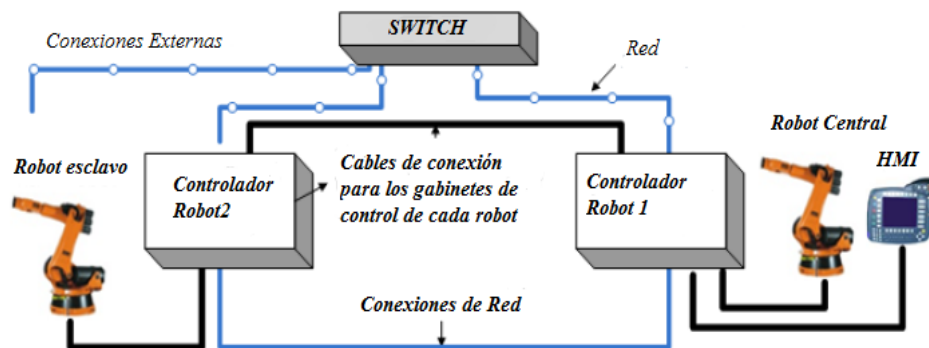
- Al momento de poner en marcha la celda de trabajo, es posible que cierto elementos no se encuentren energizados por lo que puede surgir errores o posibles fallas en su funcionamiento por tanto se recomienda revisar que la celda se encuentre energizada verificando mediante el indicador luminoso “Sistema Energizado”
- Si a lo largo del funcionamiento de la celda de trabajo, suceda que la banda transportadora comienza a variar su velocidad, esto significa que la banda se ha aflojado, por lo que se recomienda asegurarse que la banda se encuentre totalmente tensionada.
- Para el reconocimiento de los objetos en el sistema de visión artificial se debe asegurar que la fuente de iluminación sea la correcta y adecuada ya que si existieran fuentes de luz externa pueden aparecer ciertos ruidos y el reconocimiento puede ser afectado es decir, puede confundir un color con otro o en algunos casos no ser detectado.
- Al momento en el que la celda se encuentra operando se recomienda a los usuarios ubicarse fuera del área de trabajo de los robots para evitar posibles golpes.
- Si la celda de trabajo ha estado en desuso por un tiempo considerable, se recomienda realizar un mantenimiento previo, antes de realizar el arranque del sistema.
- Es muy importante tener el manual de operación de la celda y el conocimiento del mismo al momento de poner en marcha la celda de trabajo, de esta manera nos aseguraremos de cumplir con los requerimientos previos y así evitar fallas y principalmente daños en la celda.

- Al momento que un determinado componente de la celda de trabajo requiera atención se debe siempre presionar el paro de emergencia esto con el fin de evitar accidentes tanto de descargas eléctricas o movimientos inesperados de los manipuladores causando golpes graves.

Trabajos futuros

Como próxima etapa de investigación se propone añadir que cada robot tenga su propio controlador los cuales serán independientes entre sí, los cuales enviarán toda la información a un computador central. Dando inicio la aplicación de la Industria 4.0 en conjunto con la arquitectura IoT de tal manera que el proceso pueda ser visualizado y supervisado desde cualquier punto. Para lo cual se pone a consideración, el cambio de sistema de visión artificial, por uno más robusto acorde a la aplicación de tal manera que se pueda tener un reconocimiento exacto de los objetos y para que cada robot sea independiente se propone añadir una segunda cámara en la línea la cual hará más eficiente el proceso. Y finalmente añadir un manipulador el cual se encargue de colocar las piezas de manera automática en la banda transportadora.

El esquema propuesto se lo observa en la Figura 35 la cual se repite nuevamente.



BIBLIOGRAFÍA

Acuña, F., Singaña, M., Acosta, N., & Caizalitin, E. (2015). *Diseño e Implementación de una Celda de de Manufactura Robotizada para la Replica de piezas 3D, mediante fresado en el Laboratorio de Robotica Industrial de la ESPE-EL*. PAPER, Latacunga. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9142/1/AC-ESPEL-MEC-0029.pdf>

Archila Diaz, J., Suell Dutra, M., & Diaz, C. (2007). Design and Cconstruction of a manipulator type SCARA, implementing a control system. *19th International Congress of Mechanical Engineering*.

ATMEL. (2016). *Atmega*.

AytecAutomation. (2017). *Aytec Automation*. Obtenido de <http://www.aytec-gmbh.de/services/other/cooperating-robots/?L=1>

Barahona Avalos, J. (2011). *Robótica I: Cinemática Directa*. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Electrónica y Mecatrónica.

Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de Robotica*. Madrid, España: McGraw-Hill.

Betancourt, D. (Abril de 2016). *Capacidad de Producción*. Obtenido de Ingenio Empresa: <https://ingenioempresa.com/capacidad-produccion-empresa/#>

BOCH. (2017). *BOCH*. Obtenido de <http://www.bosch-ibusiness.com/boaaelmoocs/category/CEP/283>

BTI. (2017). *BTI-Balance Technology Inc*. Obtenido de <http://balancetechnology.com/es/products/dimensional-gages/>

Budynas, R., & Nisbett, J. (2011). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9th ed.). Mc Graw Hill.

Carvajal, A., & Martinez, S. (2016). *Diseño y Construcción de un torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta epernada en una celda de trabajo*. Universidad de

las Fuerzas Armadas-ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Sangolquí.

Culqui, B. (2015). *Sistemas Flexibles de Manufactura*. Sangolquí: ESPE.

DUNLOP. (2009). *Conveyor Handbook*.

Duque Fernandez, A. (2009). *Sistema de atención visual para la detección de puntos topológicos de referencia*. Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/40804360_Sistema_de_atencion_visual_para_la_deteccion_de_puntos_topologicos_de_referencia

ESBELT. (2013). *Catálogo de bandas transportadoras Serie ASTER*.

Fu, K., Gonzalez, R., & Lee, C. (2006). *Robótica: Control, detección, visión e inteligencia*. Madrid: McGraw-Hill.

Gamba, S. (2016). *Metalmecánica*. Obtenido de <http://www.metalmecanica.com/temas/Robots-industriales,-puerta-de-entrada-a-la-nueva-manufactura+112014>

Gamboa, J., & Ramirez, M. (2008). *Multi-Agent Design To Migrate A Flexible Manufacturing Cell To A Holonic System*. Mexico.

Garza, M. G. (2009). El impacto de la robótica en la industria mexicana.

Groover, M. (2010). *Automation, Production Systems, and Computer Integred Manufacturing* (3th ed.). Pennsylvania: Pearson.

Huegro. (2016). *Constantini*. Obtenido de <http://www.costantini-sa.com/automatizaciones/solucion/2906-pbic-celda-paletizado-bidones-por-capa>

HUIHAI. (2017). *Made in China.com*. Obtenido de HUIHAI: <http://huihai0321.en.made-in-china.com/product/ZsJxhSoEhYVg/China-Auto-Windshield-Wiper-Motor-for-Mercedes-Benz-OE-9-390-453-023.html>

Ibarra, A. (2017). *Robotica Industrial*. Sangolquí, Ecuador.

- Industry, D. (2017). *Direct Industry*. Obtenido de <http://www.directindustry.com/prod/adept-technology/product-6076-15692.html>
- INFAIMON. (2011). *Vision Artificial Aplicada a la Industria*. Obtenido de [infaimon.com](http://www.infaimon.com)
- INFAIMON. (2017). *Visión Artificial*. Obtenido de <http://www.infaimon.com/es/blogs/enciclopedia-iluminacion>
- Ingeniería, T. (2017). *Robótica*. Obtenido de http://www.tecnoing.com/p_robotica.aspx
- Jaramillo Botero, A. (2005). *Cinematica de Manipuladores*.
- Kelly, R., & Santibañez, V. (2003). *Automatica & Robotica : Control de Movimiento de Robots Manipuladores*. España: PEARSON.
- Koukolová, L., & Swic, A. (2014). *Robotics and manufacturing systems*. Lublin.
- KUKA. (2007). *CR Motion Cooperation 2.1 for KUKA System Software (KSS) 5.3/5.4/5.5*. Augsburg.
- KUKA. (2017). *KUKA*. Obtenido de <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-16>
- Makris, S., Michalos, G., Eytan, A., & Chryssolouris, G. (2012). *Cooperating Robots for Reconfigurable Assembly Operations: Review and Challenges*. Patras.
- MERCURIO, E. (5 de Agosto de 2016). *Grupo Eljuri tiene procesos robotizados para ensamblar*. Cuenca, Ecuador. Obtenido de <http://www.elmercurio.com.ec/546634-grupo-eljuri-tiene-procesos-robotizados-para-ensamblar/>
- Montufar, P., & Salazar, H. (2017). *Diseño y construcción de una celda de trabajo para clasificación de piezas en movimiento con un robot SCARA*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Sangolquí.
- Nogue, A., & Antiga, J. (2012). *Visión Artificial*. España.
- Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas* (4th ed.). Pearson.

- OMRON. (2014). Obtenido de <http://www.simondecolonias.net/actividades/jornadas-tecnicas/535-jornada-soluciones-omron-mecatronica-robotica-vision-artificial-industria>
- Pereira Ruiz, S. (2009). *Localización de Robots mediante Filtro de Kalman*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11879/fichero/PFC+Sergio+Pereira+Ruiz%252F7+-+Filtro+de+Kalman.pdf>
- Perez Montes de Oca, I. (2008). *Proyecto para incrementar la productividad con el diseño de células de manufactura en el área de condensadores en una empresa metalmeccánica*. TESIS-MAESTRIA, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Ciencias Sociales y Administrativas, México.
- Porras, J., & De la Cruz, M. (2015). *Clasification system based on computer vision*.
- ROULUNDS. (2001). *Conveyors Belts*. Denmark.
- Salinas, F. (2014). Llave en Manos. Centro Tecnológico ASCAMM. Obtenido de http://www.eurecat.orgfiles/ascammtech/ascammtech13/webcontent_ok/cast_persones.html
- Saltaren, R. (1996). *Herramientas para el modelado y diseño paramétrico de robots basadas en la dinámica de los sistemas multicuerpo*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Sanchez, O. (2008). *Cinematica de los Manipuladores*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/omarspp/cinematica-de-los-manipuladores>
- Santos, K., & Gonzaga Trabasso, L. (2012). *A cooperative robotic system applied to the riveting proces*. Aeronautic Institute of Technology, Aircraft Structure Assembly Automation Laboratory, Sao Paulo.
- Sena, J. (2007). *Analisis y diseño de sistemas flexibles de manufactura*. Mexico: McGraw Hill.
- Shayang, I. (2017). *Shayang Ye Industrial, DC Motor*. Obtenido de <https://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/ig52-04-24vdc-082-rpm-gear-motor-with-encoder/1181/>

- Teach Industrial, C.-C. (2009). *CMB-CETA-Teach Industrial*.
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (5th ed.). Mexico: Mc Graw Hill.
- Universal Robots . (10 de marzo de 2016). Obtenido de <http://www.universal-robots.com/es/casos-pr%C3%A1cticos/bj-gear/>
- Vaughn, R. (1981). *Introducción a la Ingeniería Industrial*. México: Reverte.
- Villafañe, A., & Peña, M. (2012). *SCARA*. Universidad de Sevilla, Sevilla. Obtenido de <http://perso.wanadoo.es/e/alimapp/scara/aplicaciones.htm>
- VINSSA. (2017). *VINSSA*. Obtenido de <http://vinssa.com/robot-scara>
- Welch, G., & Bishop, G. (2001). *An Introduction to the Kalman Filter*. Carolina del Norte: Chapel Hill.
- Yacuzzi, E., & Martín , F. (2009). *QFD: Conceptos, Aplicaciones y Nuevos Desarrollos*.