



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 Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE
TRABAJO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN
MOVIMIENTO CON UN ROBOT SCARA**

**AUTORES: MONTÚFAR RUALES, KARLA PAOLA
SALAZAR ESCOBAR, HUGO DAVID**

DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR

SANGOLQUÍ

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE TRABAJO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN MOVIMIENTO CON UN ROBOT SCARA**” realizado por los señores **KARLA PAOLA MONTÚFAR RUALES** y **HUGO DAVID SALAZAR ESCOBAR**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas-ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo públicamente y autorizar a los señores **KARLA PAOLA MONTÚFAR RUALES** y **HUGO DAVID SALAZAR ESCOBAR** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 17 de abril del 2017

MSc. DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **KARLA PAOLA MONTÚFAR RUALES** con cédula de identidad N° 171946005-5 y **HUGO DAVID SALAZAR ESCOBAR** con cédula de identidad N° 180464587-5, declaramos que este trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE TRABAJO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN MOVIMIENTO CON UN ROBOT SCARA**” ha sido desarrollada considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 17 de abril del 2017

KARLA PAOLA MONTÚFAR RUALES

CC. 171946005-5

HUGO DAVID SALAZAR ESCOBAR

CC. 180464587-5



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **KARLA PAOLA MONTÚFAR RUALES** y **HUGO DAVID SALAZAR ESCOBAR** autorizamos a la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE TRABAJO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN MOVIMIENTO CON UN ROBOT SCARA**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 17 de abril del 2017

KARLA PAOLA MONTÚFAR RUALES

CC. 171946005-5

HUGO DAVID SALAZAR ESCOBAR

CC. 180464587-5

DEDICATORIA

A nuestras familias quienes con su cariño y apoyo hicieron posible la culminación de esta etapa

Paola y Hugo

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres quienes con su paciencia y cariño han sabido ser soporte y guía, siempre brindándonos su apoyo incondicional.

A los amigos que estuvieron siempre dispuestos a brindarnos una mano y aportar con conocimiento a la concepción de este trabajo y a nuestros amigos con los cuales compartimos grandes experiencias en la etapa universitaria.

También, queremos agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE por brindarnos los conocimientos necesarios durante el transcurso de la carrera. Al grupo de trabajo del Laboratorio de Procesos de Manufactura por aportarnos su experiencia para el desarrollo del presente trabajo. A los ingenieros Luis Segura y Byron Cortez por aportar con sus conocimientos y una mención especial merece nuestro director de proyecto de titulación MSc. David Loza quien supo guiarnos a la culminación de este objetivo con su constante seguimiento y ayuda.

Gracias al aporte de todos y cada uno de ustedes, este proyecto tuvo un feliz término.

Muchas gracias a todos.

Paola y Hugo

TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
TABLA DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii
CAPÍTULO I	1
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Justificación e Importancia	3
1.4 Alcance	4

1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.1 Objetivos específicos.....	5
1.6 Estructura del documento	6
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Robot SCARA	7
2.1.1 Historia.....	7
2.1.2 Características	7
2.1.3 Aplicaciones	9
2.2 Sistemas de visión artificial empleados en la Robótica.....	10
2.2.1 Introducción a la visión artificial	11
2.2.2 Elementos de un sistema de visión.....	12
2.2.3 Etapas de un sistema de visión artificial	13
2.3 Filtro de Kalman	14
2.3.1 Componentes del Filtro de Kalman.....	15
2.3.2 Algoritmo del Filtro de Kalman	16
2.3.3 Filtro de Kalman en la industria robótica.....	19
2.4 Celda de Trabajo.....	19

2.4.1 Disposición de un robot en una celda de trabajo.....	20
2.4.2 Ventajas de una Celda de Trabajo.....	22
2.5 Resumen.....	22
CAPÍTULO III	24
DISEÑO CELDA DE TRABAJO PARA EL ROBOT SCARA	24
3.1 Matriz de la calidad.....	24
3.1.1 Definición de necesidades	24
3.1.2 Definición de características técnicas	25
3.1.3 QFD.....	26
3.2 Factibilidad y planeación	27
3.2.1 Estructura funcional	27
3.3 Subsistema 1. Banda Transportadora.....	28
3.3.1 Tipo de banda	29
3.3.2 Material de la banda	33
3.3.3 Sistema de tensionamiento de la banda.....	37
3.3.4 Diseño final de la Banda transportadora	39
3.4 Subsistema 2. Tarjeta de control.....	68
3.4.1 Tipo de microcontrolador.....	68
3.4.2 Medio de transmisión de datos.....	72

3.4.3 Diseño Final de la Tarjeta de control	75
3.5 Subsistema 3. Sistema de visión artificial	80
3.5.1 Diseño Final del sistema de visión artificial	80
3.6 Subsistema 4. Filtro de Kalman	83
3.6.1 Cinemática del Robot SCARA.....	83
3.6.2 Modelamiento dinámico.....	85
3.6.3 Diseño Final del Filtro de Kalman	86
3.7 Subsistema 5. Interfaz Humano-Máquina	90
3.7.1 Software de para creación de HMI.....	90
3.7.2 Diseño Final	92
3.9 Concepto Final	94
3.10 Resumen.....	95
CAPÍTULO IV	97
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....	97
4.1 Reparación del robot SCARA.....	97
4.1.1 Situación inicial del Robot SCARA.....	97
4.1.2 Mantenimiento correctivo del Robot SCARA	98
4.1.3 Adecuación y cableado de sensores y actuadores del robot.....	99
4.1.4 Drivers de potencia para el control del robot	104

4.1.5 Circuito para el control del robot	106
4.2 Construcción de la estructura de la banda transportadora y soporte del robot ...	107
4.2.1 Corte y soldadura de los elementos de la banda.....	108
4.2.2 Manufactura del acople para el motor.....	109
4.2.3 Pintura de la estructura.....	110
4.2.4 Ensamble final de las partes de la banda y soporte del robot.....	110
4.2.4 Pruebas de carga en la banda transportadora	111
4.3 Construcción del tablero de control	112
4.3.1 Elaboración de los circuitos electrónicos	112
4.3.2 Distribución y conexión de los elementos en el tablero de control.....	112
4.3.3 Pruebas de funcionamiento del tablero de control	113
4.4 Implementación del sistema de visión artificial	114
4.4.1 Elementos del sistema de visión artificial.....	114
4.4.2 Calibración de la cámara y determinación de las coordenadas de los objetos	116
4.4.3 Prueba de reconocimiento de colores y formas.....	117
4.4.4 Resultados de las pruebas de reconocimiento de colores.....	117
4.5 Implementación del algoritmo de Filtro de Kalman	118
4.5.1 Pruebas y Resultados del Filtro de Kalman	118

4.5.1.1 Comparación de los datos de mediciones y la predicción del filtro.....	118
4.5.1.2 Resultados de la predicción.....	119
4.5.1.3 Comparación de la posición final de la pieza y la predicción del filtro....	120
4.5.1.4 Comparación de la posición final de la pieza y la predicción con filtro y sin filtro.....	126
4.5.3.5 Resultados de la comparación con la utilización de filtro y sin filtro.....	126
4.6 Análisis de ventajas de la implementación del Filtro de Kalman en la producción.....	127
4.6.1 Análisis de disminución de tiempo.....	127
4.6.2 Análisis de aumento de producción.....	129
4.7 Resumen.....	130
CAPÍTULO V.....	132
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	132
5.1 Conclusiones.....	132
5.2 Recomendaciones.....	134
5.3 Trabajos futuros.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Simbología de las ecuaciones del modelo dinámico y de medición	17
Tabla 2 Ecuaciones del Algoritmo de Filtro de Kalman	18
Tabla 3 Requerimientos o necesidades del consumidor	25
Tabla 4 Especificaciones técnicas del proyecto	25
Tabla 5 Escala Japonesa de correlación entre requerimientos	27
Tabla 6 Resultados de la matriz QFD.....	27
Tabla 7 Subsistemas definidos para el diseño	28
Tabla 8 Alternativas de material para la mesa de la banda	31
Tabla 9 Ponderación de criterios de evaluación para el material de la mesa de la banda.....	32
Tabla 10 Ponderación de costos para las alternativas del material de la mesa de la banda.....	32
Tabla 11 Ponderación de peso para las alternativas del material de la mesa de la banda.....	32
Tabla 12 Ponderación de maquinabilidad para alternativas del material de la mesa de la banda	32
Tabla 13 Ponderación de implementación para alternativas del material de la mesa de la banda	33

Tabla 14 Conclusión en la selección de diseño para el material de la mesa de la banda.....	33
Tabla 15 Alternativas del material de la cubierta de la banda.....	35
Tabla 16 Ponderación de criterios de evaluación para el material de la banda	36
Tabla 17 Ponderación de costos para las alternativas del material de la banda	36
Tabla 18 Ponderación de la carga para las alternativas del material de la banda.....	36
Tabla 19 Ponderación de implementación para las alternativas del material de la banda.....	36
Tabla 20 Conclusión en la selección de diseño para el material de la banda	36
Tabla 21 Características técnicas de la banda de PVC ASTER A15QF	37
Tabla 22 Coeficiente de fricción de las partes giratorias (f).....	44
Tabla 23 Eficiencias mecánicas de equipos reductores de velocidad	48
Tabla 24 Características técnicas del motor BOSCH CEP 12V	49
Tabla 25 Simbología de las fuerzas	53
Tabla 26 Características técnicas de los rodillos motriz y de cola	61
Tabla 27 Características técnicas de la chumacera CMB UCF204-12.....	64
Tabla 28 Especificaciones técnicas del módulo PWM.....	66
Tabla 29 Alternativas del microcontrolador para el sistema	70
Tabla 30 Ponderación de criterios de evaluación del microcontrolador	70

Tabla 31 Ponderación de costos para las alternativas del microcontrolador.....	70
Tabla 32 Ponderación de la carga para las alternativas del microcontrolador	71
Tabla 33 Ponderación de implementación para las alternativas del microcontrolador ..	71
Tabla 34 Conclusión en la selección de diseño para el microcontrolador.....	71
Tabla 35 Especificaciones técnicas del microcontrolador ATMEGA 328P	71
Tabla 36 Alternativas de medio de comunicación entre PC y tarjeta de control.....	73
Tabla 37 Ponderación de criterios de medio de comunicación entre PC y tarjeta de control.....	74
Tabla 38 Ponderación de costos para alternativas de medio de comunicación.....	74
Tabla 39 Ponderación de la velocidad para las alternativas de medio de comunicación.....	74
Tabla 40 Ponderación de seguridad para las alternativas de medio de comunicación ...	74
Tabla 41 Ponderación de implementación para las alternativas de medio de comunicación.....	74
Tabla 42 Conclusión en la selección para el medio de comunicación entre PC y Tarjeta de control.....	75
Tabla 43 Especificaciones técnicas del módulo D-SUN USB a TTL	75
Tabla 44 Funciones de transferencia y constantes del controlador de los motores	79
Tabla 45 Parámetros de Denavit Hartenberg.....	83
Tabla 46 Alternativas de software de diseño para la creación de HMI.....	91

Tabla 47 Ponderación de criterios de evaluación para el software de la HMI	91
Tabla 48 Ponderación de costos para las alternativas del software para la HMI	91
Tabla 49 Ponderación de compatibilidad con Python para alternativas de software para la HMI.....	92
Tabla 50 Ponderación de implementación para las alternativas del software para la HMI	92
Tabla 51 Conclusión en la selección de diseño para el software de la HMI.....	92
Tabla 52 Detalle de la Arquitectura y Funcionamiento de la HMI	94
Tabla 53 Descripción de actividades de reparación del robot SCARA.....	97
Tabla 54 Especificaciones técnicas del motor DC IG52	101
Tabla 55 Especificaciones técnicas del motor ROBOTZONE HDA 8-2.....	102
Tabla 56 Especificaciones técnicas del circuito integrado L298N.....	104
Tabla 57 Especificaciones técnicas del circuito integrado VNH2SP30.....	105
Tabla 58 Medición de corriente del motor	111
Tabla 59 Especificaciones técnicas Webcam C300	114
Tabla 60 Requerimientos de hardware para el computador	115
Tabla 61 Datos medición de la cámara y Filtro de Kalman	119
Tabla 62 Cálculo del error en cada predicción	120
Tabla 63 Resultados de las pruebas realizadas por forma	123

Tabla 64 Resultados de las pruebas realizadas por color	125
Tabla 65 Resultados de las pruebas realizadas con filtro y sin filtro	127
Tabla 66 Comparación en tiempo de los casos propuestos	129
Tabla 67 Comparación en volumen de producción en 8 horas de los casos propuestos.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Robot SCARA THL700 para aplicaciones de soldadura de circuitos impresos.....	2
Figura 2 Robot SCARA que se implementará en la celda de trabajo.....	4
Figura 3 Esquema de la celda de trabajo propuesta.....	5
Figura 4 Esquema del Robot SCARA	8
Figura 5 Volumen de trabajo del robot SCARA	8
Figura 6 Robot SCARA utilizado en aplicaciones de clasificación de objetos.....	9
Figura 7 Visión artificial en industria alimenticia: Clasificación y envasado de chocolates	10
Figura 8 Esquema general de visión artificial	11
Figura 9 Elementos básicos de un sistema de visión.....	13
Figura 10 Diagrama de bloques de las etapas de un sistema de visión artificial.....	14
Figura 11 Esquema de Funcionamiento del Filtro de Kalman	15
Figura 12 Esquema de una celda de manufactura	20
Figura 13 Disposición del robot en el centro de la célula	21
Figura 14 Disposición del robot en línea.....	21
Figura 15 Matriz QFD del proyecto	26
Figura 16 Esquema de banda transportadora de rodillos.....	29

Figura 17 Esquema de Banda transportadora tipo mesa.....	30
Figura 18 Sistema de ajuste por tornillo.....	38
Figura 19 Sistemas de autoajuste: a) sistema de autoajuste mediante actuadores eléctricos, neumáticos o electro hidráulicos. b) sistema de autoajuste por gravedad.....	38
Figura 20 Figuras a ser transportadas por la banda	40
Figura 21 Variables para el cálculo de la velocidad de la banda.....	40
Figura 22 Área transversal del objeto a transportar.....	41
Figura 23 Motor BOSCH CEP 12V	49
Figura 24 Tensiones de la banda	49
Figura 25 Deformaciones del rodillo motriz	53
Figura 26 Factor de seguridad del rodillo.....	54
Figura 27 Esquema del tambor motriz	55
Figura 28 Diagrama de cuerpo libre de la barra	55
Figura 29 Diagramas de fuerza cortante y momento flector del eje del tambor motriz .	56
Figura 30 Diagramas de fuerza cortante y momento flector del eje del tambor de cola	60
Figura 31 Fuerzas que actúan en los rodamientos del eje del tambor de cola.....	61
Figura 32 Esquema de la estructura de la banda transportadora	65
Figura 33 Modulo PWM	66
Figura 34 Esquema de conexión del módulo PWM.....	66

Figura 35 Circuito de control de la banda transportadora y esquema 3D	67
Figura 36 Conexión del módulo D-SUN al microcontrolador	76
Figura 37 Circuito pasa-bajos para convertidor ADC	76
Figura 38 Circuito de la tarjeta de control	78
Figura 39 Esquema 3D de la tarjeta de control	78
Figura 40 Esquema de ubicación de los motores en el robot	79
Figura 41 Algoritmo del sistema de control de visión artificial	82
Figura 42 Esquema de robot SCARA para definir parámetros del método de Denavit Hartenberg	83
Figura 43 Algoritmo del Filtro de Kalman	89
Figura 44 Esquema de la distribución de la HMI	93
Figura 45 Concepto final de la celda de trabajo	95
Figura 46 Desalineamiento inicial del robot SCARA	98
Figura 47 Desarmado y evaluación del robot	98
Figura 48 Eslabones del robot alineados correctamente	99
Figura 49 Cables rotos y desconectados de las borneras	100
Figura 50 Conector sin cables	100
Figura 51 Bornera soldada los cables de los elementos del robot	100
Figura 52 Motor DC IG52	101

Figura 53 Actuador lineal para la articulación prismática.....	102
Figura 54 Sensor resistivo utilizado para el posicionamiento del robot.....	102
Figura 55 Esquema del puente H L298N	104
Figura 56 Esquema del driver VNH2SP30	105
Figura 57 Circuito de control del robot	106
Figura 58 Esquema 3D del circuito de control del robot.....	106
Figura 59 Procedimiento para la construcción de la banda y soporte del robot.....	108
Figura 60 Corte y soldadura de las piezas de la banda transportadora.....	108
Figura 61 Taladrado y doblado de piezas	109
Figura 62 Torneado y taladrado del acople para el motor	109
Figura 63 Pintura de las piezas de la banda transportadora.....	110
Figura 64 Ensamblaje de la estructura.....	110
Figura 65 Estructura final	111
Figura 66 Banda transportadora con carga máxima	111
Figura 67 Circuitos electrónicos de la celda de trabajo.....	112
Figura 68 Vista exterior y distribución de los elemento del tablero de control.....	113
Figura 69 Indicadores de sistema energizado y encendido	113
Figura 70 Indicador de sistema detenido por pulsador de emergencia.....	114
Figura 71 Webcam C300.....	114

Figura 72 Objetos usados para el reconocimiento del sistema de visión	115
Figura 73 Posiciones del tablero para la calibración de la cámara	116
Figura 74 Coordenadas en pixeles y reales del centroide del objeto.....	117
Figura 75 Prueba de reconocimiento de colores.....	117
Figura 76 Prueba de reconocimiento de Formas	118
Figura 77 Comparación Medición y Filtro de Kalman.....	119
Figura 78 Comparación entre Predicción de Filtro y Posición real.....	121
Figura 79 Comparación entre Predicción y Posición real con triángulos.....	121
Figura 80 Comparación entre Predicción y Posición real con cuadrados	122
Figura 81 Comparación entre Predicción y Posición real con pentágonos	122
Figura 82 Comparación entre Predicción de Filtro y Posición real clasificación por color	123
Figura 83 Comparación entre Predicción y Posición real con objetos azules	124
Figura 84 Comparación entre Predicción y Posición real con objetos amarillos	124
Figura 85 Comparación entre Predicción y Posición real con objetos verdes.....	125
Figura 86 Comparación entre Predicción de con filtro, sin filtro y posición real	126
Figura 87 Error en la predicción con filtro y sin filtro	126
Figura 88 Intervalo de tiempo entre piezas	128
Figura 89 Esquema propuesto para trabajos futuros	135

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña y construye una celda de trabajo para un robot SCARA existente, cuyo objetivo es la clasificación de piezas en movimiento que son transportadas en una banda de acuerdo a su forma o color. La primera parte del trabajo se trata en los capítulos 1 y 2 y se habla sobre conceptos básicos de robótica, visión artificial y celdas de trabajo. También se habla del Filtro de Kalman y se describe su funcionamiento y ecuaciones matemáticas para el posterior desarrollo del algoritmo. En el capítulo 3 se realiza el desarrollo de las alternativas de diseño existentes para determinar la mejor opción que permita cumplir los requerimientos técnicos identificados previamente de acuerdo a los requerimientos del usuario. También se realiza el diseño de cada uno de los subsistemas definidos tanto en la parte mecánica, electrónica y de software. En el capítulo 4 se detalla la construcción de los subsistemas, se realizan diferentes pruebas y se analiza sus resultados con la finalidad de obtener información para una lograr la optimización del sistema. Adicionalmente se realiza un análisis de las ventajas de aplicar el filtro de Kalman considerando las condiciones de la celda de trabajo construida. El trabajo finaliza con las conclusiones del mismo, recomendaciones para un mejor desempeño de la celda de trabajo y propuestas para trabajos futuros en función de la celda existente.

PALABARAS CLAVE:

- **CELDA DE TRABAJO**
- **ROBOT SCARA**
- **SISTEMA VISIÓN ARTIFICIAL**
- **FILTRO DE KALMAN**

ABSTRACT

In this work was designed and implemented a robotic cell for an existent SCARA, whose purpose is to classify moving pieces along a conveyor belt according to their shape and color. The first part of this work is detailed in chapters 1 and 2, it deals about basic topics of robotics, artificial vision and robotic cells. Kalman Filter is also introduced and its behaviour is analyzed, and the mathematical equations are described to develop the algorithm. Chapter 3 contains the developing of existing design choices to decide the best to accomplish with technical requirements previously identified according to client requirements. It is also designed each one of the defined subsystems about mechanics, electronics and software. Chapter 4 details the construction of subsystems, some testes are performed and their results are analyzed to get useful information to optimize the system. Additionally, a benefits analysis is done considering the conditions of the robotic cell constructed. Work finishes with conclusions, recommendations for robotic cell with best performance and proposals to future works.

KEYWORDS:

- **ROBOTIC CELL**
- **SCARA ROBOT**
- **ARTIFICIAL VISION SYSTEM**
- **KALMAN FILTER**

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 Introducción

Actualmente, se busca que los productos introducidos al mercado tengan un menor tiempo de fabricación, de manera que sus costos disminuyan y su producción sea rentable. Los robots de configuración SCARA “*Selective Compliance Assembly Robot Arm*”, son ampliamente utilizados en la industria, con varias aplicaciones tales como dispensado, ensamblaje, soldadura, manipulación y etiquetado (Low, 2007). Debido a su arquitectura de accionamiento directo (motores colocados directamente en las articulaciones) tienen una velocidad alta y gran precisión. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, Fundamentos de robótica, 2007). Los Robots SCARA tienen mayor alcance en el plano horizontal con relación al vertical, debido a sus dos articulaciones rotacionales. (García & Castillo , 2007).

A nivel mundial existen diferentes marcas de robots SCARA, las aplicaciones de los mismos son variadas y dependen de la industria en que se apliquen. Entre las más representativas se encuentra la industria electrónica, en ella se destacan procesos de manufactura de circuitos impresos, ensamble de celulares y discos duros; como ejemplo el robot SCARA THL700 de Toshiba, que es utilizado para aplicaciones de soldadura de circuitos impresos como se muestra en la Figura 1. El robot se caracteriza por la alta precisión requerida para la ejecución de su tarea (Toshiba machine Industrial robotics, 2015).

El presente proyecto propone el diseño y construcción de una celda de trabajo para un robot SCARA, simulando un proceso de clasificación de objetos de acuerdo a su forma o color en tiempo real.



Figura 1 Robot SCARA THL700 para aplicaciones de soldadura de circuitos impresos

Fuente: (Caionix Automations, 2016)

Para cumplir con los objetivos del proyecto, son necesarios varios elementos que permiten completar el proceso, tales como la implementación de un sistema de visión artificial para el robot mediante la utilización de una cámara web y la implementación del filtro de Kalman para la predicción de la trayectoria del efector final del robot.

1.2 Planteamiento del Problema

En la actualidad, la industria tiende a buscar eficiencia en sus procesos, por lo que se hace énfasis en objetivos como: mejora de la productividad, disponibilidad y fiabilidad. Generalmente, en los procesos industriales se presenta una pérdida significativa de tiempo en la producción, lo cual influye en un aumento de costos de fabricación.

En las aplicaciones a nivel industrial, para que un robot realice cualquier proceso con objetos que están ubicados sobre una banda transportadora, tal como el proceso de clasificación de materiales, es necesario que la banda se detenga para que el robot realice la acción sobre el objeto y una vez finalizada la tarea, la banda continúa en movimiento. La desventaja de este procedimiento es que se tiene un aumento en el tiempo de producción debido a que la banda transportadora debe detenerse el tiempo que se demora el robot en tomar el objeto, lo que influye en el aumento del costo

final de un producto. Por ello la implementación del proyecto a nivel industrial, permitirá contribuir para lograr una mayor eficiencia en la producción industrial.

1.3 Justificación e Importancia

El desarrollo del proyecto permitirá optimizar el proceso de clasificación de materiales, utilizando un sistema de visión artificial para la organización de los objetos por su forma o color. Dotando al robot de un controlador más eficiente que permita disminuir tiempos de proceso y recursos utilizados en el mismo, al predecir la posición del objeto, permitiendo definir la trayectoria que debe realizar su efector final para trabajar sobre el objeto sin necesidad de detener el sistema de transporte del mismo.

En consecuencia, se cumple con los objetivos de la eficiencia en procesos de producción; mejorando la productividad al disminuir los tiempos de producción y logrando disponibilidad y fiabilidad al maximizar el tiempo operativo del proceso de producción.

Adicionalmente, el proyecto tiene como base el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017 (Senplades, 2013), dentro del cual se considera el objetivo No.10 “Impulsar la transformación de la matriz productiva”, en el que se expresa:

- Artículo 10.1 Diversificar y generar mayor valor agregado en la producción nacional, según el literal f: “Articular la educación y la investigación a la generación de capacidades técnicas y de gestión, para dinamizar la transformación productiva”.
- Artículo 10.2 Promover la intensidad tecnológica en la producción primaria, de bienes intermedios y finales, según el literal a: “Articular la investigación científica, tecnológica y la educación superior con el sector productivo, para una mejora constante de la productividad y competitividad sistémica, en el marco de las necesidades actuales y futuras del sector productivo y el desarrollo de nuevos conocimientos”.

1.4 Alcance

El proyecto se plantea como una mejora a los procesos industriales actuales, se pretende integrar un robot SCARA a una celda de trabajo, el cual disponga de un controlador más eficiente que permita reducir tiempos de producción.

Se contempla el diseño, construcción e implementación de una celda de trabajo automatizada que consta de un robot SCARA existente con actuador magnético (ver Figura 2) y una banda transportadora.

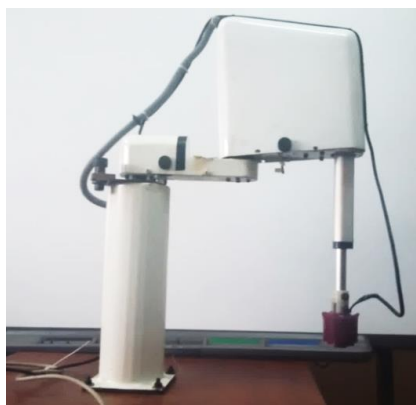


Figura 2 Robot SCARA que se implementará en la celda de trabajo

Se realiza el diseño electrónico de los sistemas de control y potencia de la banda transportadora y del robot y se elaborará una interfaz para el monitoreo del funcionamiento del sistema por parte del usuario.

Las tareas específicas que serán realizadas en la celda de trabajo del robot SCARA a implementar son:

- Reparación e integración del robot SCARA a la celda de trabajo
- Diseño y construcción de una banda transportadora horizontal.
- Diseño de la tarjeta de control para el proceso
- Clasificación de objetos que se encuentran sobre una banda transportadora en movimiento, por forma o color, mediante un sistema de visión artificial implementada con una webcam.

- Estimación de la posición del objeto, aplicando el algoritmo del filtro de Kalman y definición de la trayectoria del efector final del robot.
- Diseño de una HMI que permita realizar la supervisión del proceso

En la Figura 3 se indica un esquema de una celda de trabajo, la cual se plantea como idea inicial en el proyecto.

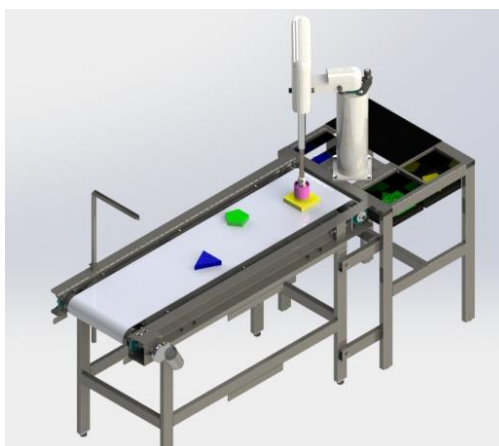


Figura 3 Esquema de la celda de trabajo propuesta

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar y construir una celda de trabajo para un robot SCARA implementando visión artificial para reconocimiento de objetos por su forma y color.

1.5.1 Objetivos específicos

- Reparar e integrar el robot SCARA a la celda de trabajo
- Diseñar y construir una banda transportadora para la celda de trabajo
- Implementar un sistema de visión artificial para el robot, el cual ayudará a realizar la clasificación de objetos
- Programar el algoritmo de filtro de Kalman para predecir la posición del objeto y establecer la trayectoria del robot

- Evaluar y verificar el adecuado funcionamiento de la celda de trabajo en conjunto con el robot

1.6 Estructura del documento

El presente documento consta de seis capítulos, en el primer capítulo se muestra la descripción general del proyecto. Se presenta el planteamiento del problema con su respectiva justificación, alcance y los objetivos del proyecto.

En el capítulo dos, titulado “*Marco Teórico*”, se muestra el fundamento teórico de investigación sobre el tema, incluyendo el robot SCARA, los fundamentos sobre la visión artificial, el principio matemático del filtro de Kalman y los conceptos de celda de trabajo.

En el capítulo tres, titulado “*Diseño de la Celda de Trabajo para el Robot SCARA*”, se presenta el desarrollo del diseño mecánico de la banda transportadora, el diseño eléctrico y electrónico de la tarjeta de control, y dimensionamiento de los sensores y actuadores, adicionalmente se presenta el diseño del sistema de control y el software para la implementación.

El capítulo cuatro, denominado “*Construcción e implementación*”, incluye la construcción de la banda transportadora, así como la implementación de la visión artificial, del algoritmo del filtro de Kalman y del sistema de control del robot SCARA y adicionalmente se realizan diferentes pruebas y se describen los resultados obtenidos de la implementación y puesta en marcha de la celda de trabajo en conjunto.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo del proyecto y la propuesta para trabajos futuros.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El capítulo presenta conceptos generales sobre el robot SCARA, su historia funcionamiento y aplicaciones, así como los elementos principales de un sistema de visión artificial y sus aplicaciones en la robótica. Adicionalmente, se detallan los conceptos del Filtro de Kalman y se analizan las ecuaciones del mismo. También, incluye conceptos acerca de celda de trabajo y las ventajas que presenta su implementación.

2.1 Robot SCARA

2.1.1 Historia

El robot SCARA “*Selective Compliance Assembly Robot Arm*”, fue desarrollado en la Universidad de Yamanashi en Japón, en 1979 por el profesor Hiroshi Makino, quien propuso un robot SCARA de 4 grados de libertad.

Este robot fue desarrollado como respuesta a la búsqueda de un robot con un número reducido de grados de libertad, costo limitado y orientación hacia el ensamblado de piezas. Posteriormente, en 1981 el robot SCARA fue introducido en el mercado. (Barrientos , Peñin, Balaguer, & Aracil, Fundamentos de Robótica, 2007).

2.1.2 Características

El robot SCARA, es un robot industrial que posee 3 articulaciones: 2 rotacionales y una lineal o prismática. Las articulaciones rotacionales poseen ejes verticales de rotación, es decir sus ejes de rotación son paralelos uno con respecto al otro, por lo

que proporcionan rigidez en la dirección vertical, pero mayor rango de trabajo en la dirección horizontal. Con las dos articulaciones rotacionales se controla la posición respecto al plano X-Y y con la articulación prismática la coordenada Z (Rodríguez Díaz & Berenguel Soria, 2004), se puede observar un robot SCARA con su configuración típica en la Figura 4.

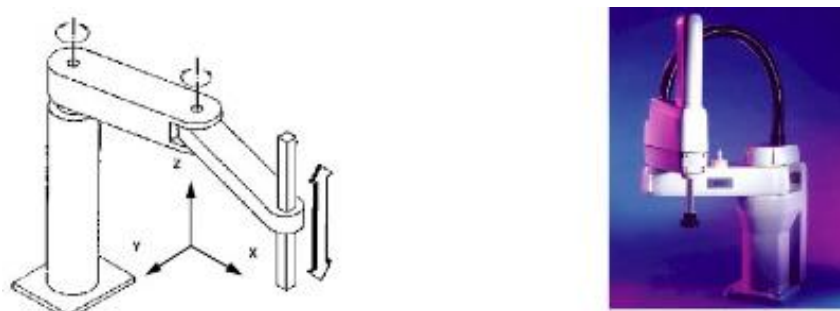


Figura 4 Esquema del Robot SCARA

Fuente: (Rodríguez Díaz & Berenguel Soria, 2004)

El robot SCARA se caracteriza por su movimiento suave y rápido, además de ser barato, pero solo tiene accesibilidad a zonas de trabajo que estén en planos perpendiculares a su eje vertical debido a que tiene movimientos limitados para su muñeca. En la Figura 5 se puede observar el volumen de trabajo de un robot SCARA.

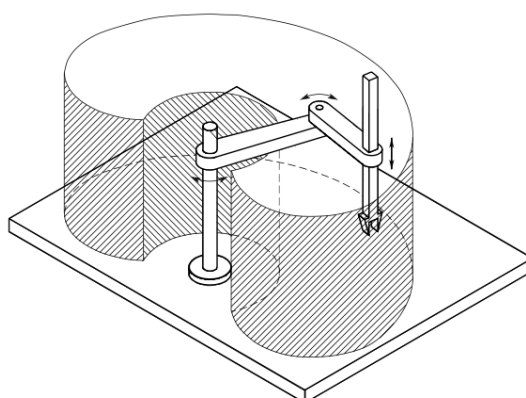


Figura 5 Volumen de trabajo del robot SCARA

Fuente: (Sciavicco, Siciliano, Villani, & Oriolo, 2010)

De acuerdo al reporte a 2005 de la FIR (Federación Internacional de Robótica), los robots de configuración SCARA corresponden al 8% del total de los manipuladores industriales instalados a nivel mundial, mientras que el restante se divide entre antropomórfico (59 %), cartesianos (20 %) y cilíndricos (12 %). (Sciavicco, Siciliano, Villani, & Oriolo, 2010).

2.1.3 Aplicaciones

El robot SCARA es muy utilizado en aplicaciones industriales, entre las aplicaciones más habituales se encuentran:

- Manejo de materiales
- Operaciones de ensamblaje
- Clasificación de materiales
- Inserción de componentes electrónicos
- Aplicaciones en la medicina
- Industria alimenticia

Por este motivo, los efectores finales comúnmente utilizados en este tipo de robots, suelen ser: pinzas, ventosas o electroimanes, dependiendo de la aplicación específica en la que sea utilizado (Groover, 2007). En la Figura 6 se puede observar un robot SCARA utilizado para el proceso de clasificación de objetos.

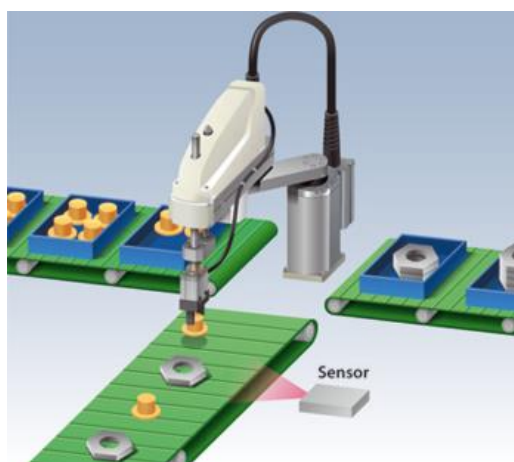


Figura 6 Robot SCARA utilizado en aplicaciones de clasificación de objetos

Fuente: (Larraoiz Electrónica, 2015)

2.2 Sistemas de visión artificial empleados en la Robótica

Actualmente, existe un amplio campo de aplicaciones para los sistemas de visión artificial (Pajares Martinzans & De la Cruz García, 2008), entre los cuales se puede mencionar:

- Robótica móvil: se utiliza para reconocimiento de lugares, identificación de obstáculos, objetos, personas, entre otros.
- Manufactura: es utilizada en la detección y clasificación de objetos, metrología, inspección y control de calidad.
- Industria alimenticia: se utiliza para mejorar tareas repetitivas e incrementar la productividad al clasificar diferentes tipos de productos. En la Figura 7 se presenta un ejemplo de visión artificial para el empaqueo de chocolates.
- Geología: a través de la visión artificial, se puede detectar movimientos de terrenos captando dos imágenes en diferentes instantes de tiempo de manera que se pueda observar la variación entre las imágenes.
- Seguridad: se puede utilizar visión artificial para el reconocimiento de huellas dactilares, identificación de rostros, entre otros.



Figura 7 Visión artificial en industria alimenticia: Clasificación y empaqueo de chocolates

Fuente: (Studwell, 2015)

2.2.1 Introducción a la visión artificial

La visión artificial, también denominada visión por computador se puede definir como un campo de la inteligencia artificial. Su objetivo es emular la función de la visión humana, para extraer características de una imagen mediante el procesamiento de la información obtenida y posteriormente, llevar a cabo la ejecución de múltiples procesos en los cuales se necesite la identificación de objetos de acuerdo a sus características visuales. La visión artificial permite a un sistema robótico obtener información geométrica y cualitativa de su entorno sin la necesidad de interacción física con el medio.

Según el libro “Visión computacional” (Sucar, 2011), la visión artificial está ligada al procesamiento de imágenes, pero sus objetivos son diferentes. Por un lado, el procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar la calidad de la imagen que será utilizada posteriormente, por lo que el resultado del procesamiento de imágenes es la misma imagen resaltando o ignorando ciertas características de la misma. Por otro lado, en la visión artificial la imagen de entrada es procesada para obtener los atributos de interés, de manera que como resultado se obtiene una descripción de la imagen analizada en función de las características deseadas, como se puede observar en la Figura 8.

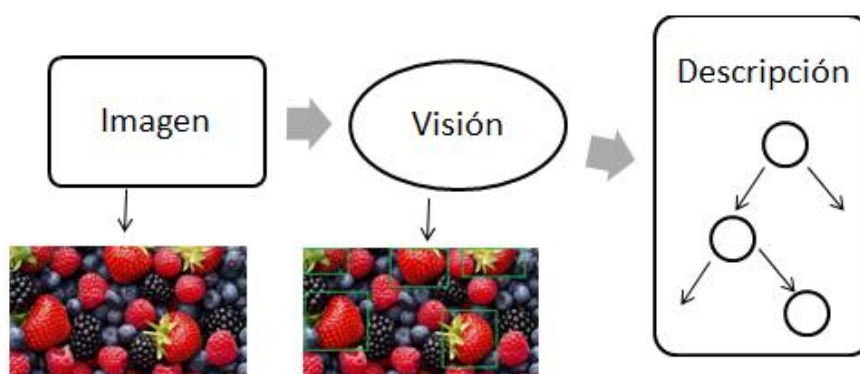


Figura 8 Esquema general de visión artificial

Los atributos de color como matiz, saturación e intensidad pueden ser usados para identificar objetos por su color. Las alteraciones de estos parámetros producen

diferentes espacios de color y en función de su valor permite reconocer los diferentes colores. Los más usados en visión por computadora son los espacios RGB y los espacios HSV.

El espacio de color RGB consiste de 3 canales de colores que son rojo, verde y azul y el color de cada pixel se mide en un intervalo de $[0,255]$. (Florczyk, 2005). El espacio HSV consiste en 3 canales: matiz, saturación y brillo.

El espacio de color RGB presenta la desventaja de inestabilidad ante variaciones de iluminación, ya que el espacio RGB no tiene una separación entre las partes de color y las de iluminación.

2.2.2 Elementos de un sistema de visión

Los elementos básicos e imprescindibles de un sistema de visión son: (González Marcos, y otros, 2006)

- Objeto:

Consiste en lo que se desea reconocer, el elemento para el cual se aplica el sistema de visión artificial.

- Iluminación:

La iluminación es el aspecto más importante en un sistema de visión artificial. Debe ser uniforme e independiente del entorno, de manera que se pueda controlar la forma en la que la cámara ve al objeto y de esta manera facilitar el reconocimiento de los objetos.

Para un adecuado procesamiento de las imágenes es necesario conseguir una iluminación estable, buscando incrementar el contraste de los elementos a detectar y evitando sombras y reflejos de los mismos. Es importante considerar que cada material refleja la luz en forma distinta, por lo que la iluminación debe ajustarse de acuerdo al objeto con el que se trabaje.

- Sensor óptico:

Es aquel que se encarga de captar la imagen y transferirla a un medio electrónico para posteriormente realizar el procesamiento. Generalmente se utilizan diferentes tipos de cámaras, las cuales pueden ser bidimensionales, lineales, matriciales y de color, la selección de cada una de ellas varía en función de la aplicación que se desee.

- Computador:

Es el encargado de almacenar y procesar las imágenes, adicionalmente debe contar con software especializado que permita ejecutar los algoritmos de preprocesamiento, segmentación y reconocimiento del objeto. En la Figura 9 se puede observar un esquema con los elementos de un sistema de visión.

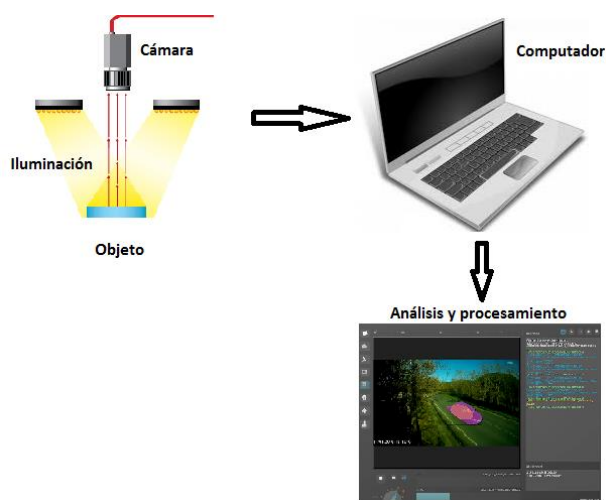


Figura 9 Elementos básicos de un sistema de visión

2.2.3 Etapas de un sistema de visión artificial

La visión artificial define 4 etapas para conseguir la descripción de una imagen (ver Figura 10):

- Etapa de captura o sensorial: consiste en la captura de imágenes digitales a través de un sensor, generalmente una cámara.

- Preproceso o Tratamiento digital de imágenes: consiste en mejorar la calidad de la imagen, resaltando o eliminando ciertas partes de la imagen.
- Segmentación: consiste en aislar los elementos deseados en una escena.
- Reconocimiento o clasificación: en esta etapa, se pretende distinguir los objetos anteriormente segmentados, analizando ciertas características, de manera que puedan ser diferenciados.

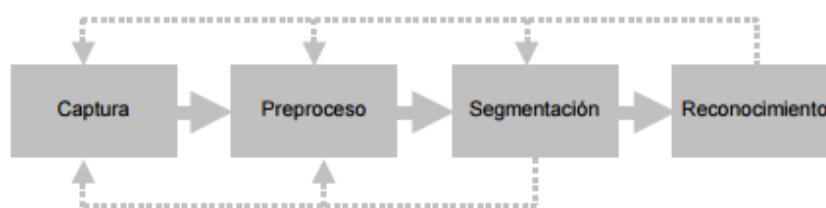


Figura 10 Diagrama de bloques de las etapas de un sistema de visión artificial

Fuente: (Vélez Serrano, Moreno Díaz, & Sánchez Calle, 2003)

Es importante tener en cuenta que las etapas mencionadas anteriormente no siempre son secuenciales, existe la posibilidad de volver a etapas anteriores en caso de que los resultados obtenidos no sean los adecuados (Vélez Serrano, Moreno Díaz, & Sánchez Calle, 2003).

2.3 Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es un estimador estadístico lineal basado en técnicas de espacio de estados y desarrollado por Rudolph E. Kalman, quien en 1960 publicó un artículo denominado “Un nuevo enfoque a los problemas de filtrado y predicción lineal” (Welch & Bishop, 2001). Es un filtro recursivo de predicción, debido a que el proceso para predecir el estado actual de un sistema se repite para cada intervalo de tiempo, tomando como valor inicial el valor de la estimación anterior, minimizando el error de covarianza estimada.

Para la estimación de estados mediante la implementación del Filtro de Kalman, se requiere que el sistema o proceso a ser estimado presente una dinámica lineal, y que el ruido que lo perturba sea blanco.

El Filtro de Kalman ha sido usado ampliamente en campos como: robótica, economía y biología. El algoritmo del Filtro de Kalman se divide en dos etapas (Marín Paniagua, 2011), cuyo esquema se puede observar en la Figura 11.

- Predicción: también denominada actualización del tiempo, el filtro permite calcular la estimación del siguiente estado, utilizando la estimación previa.
- Corrección: denominada también actualización de medidas, el algoritmo utiliza la estimación actual para refinar el resultado obtenido en la etapa de predicción, utilizando la medida tomada por un sensor.

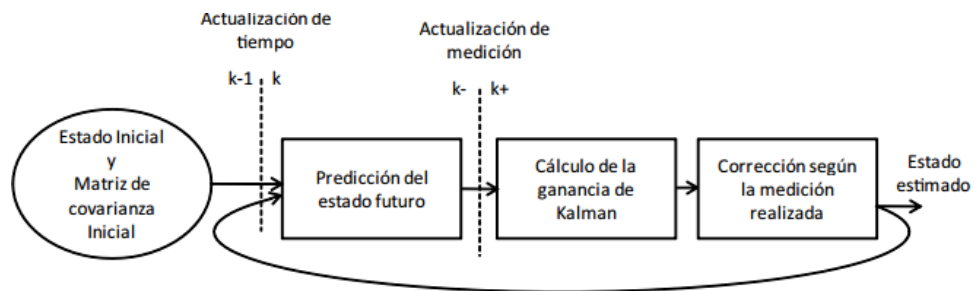


Figura 11 Esquema de Funcionamiento del Filtro de Kalman

Fuente: (Vigouroux Cavolina, 2010)

2.3.1 Componentes del Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman consta de 3 componentes básicos los cuales son: el vector de estado, modelo dinámico y modelo de medición (Pereira Ruiz, 2009).

- Vector de estado

El vector de estado está formado por las variables de interés del sistema o proceso sobre el cual se va a aplicar el algoritmo del Filtro de Kalman. Contiene dos valores: el valor estimado y el valor corregido, los cuales son denominados *a priori* y *a posteriori* respectivamente.

- Modelo dinámico

El modelo dinámico es una representación matemática que describe las variables de comportamiento de un sistema, los cuales varían en función del tiempo. Generalmente son representados por un conjunto de ecuaciones diferenciales o en matrices de espacio de estados.

- Modelo de medición

El modelo de medición u observación relaciona el estado con las mediciones. Las mediciones pueden ser representadas como ecuaciones lineales en función de las variables de estado.

2.3.2 Algoritmo del Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman busca estimar el estado de un modelo dinámico el cual se expresa por las siguientes ecuaciones (Welch & Bishop, 2001):

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + Q \quad (2.1)$$

Y el modelo de salida expresado como:

$$z_k = Hx_k + R \quad (2.2)$$

Los valores de Q y R son las matrices de covarianza del ruido del proceso y ruido de medición respectivamente, generalmente estos valores se obtienen experimentalmente. Las referencias de la simbología utilizada en las ecuaciones anteriores se indican en la Tabla 1:

Tabla 1

Simbología de las ecuaciones del modelo dinámico y de medición

Símbolo	Nombre	Dimensión
x	Estado del sistema	$n \times 1$
A	Matriz de transición de estados	$n \times n$
B	Matriz de entrada de control del sistema	$n \times 1$
Q	Covarianza del Ruido del proceso	$n \times n$
z	Medición	$m \times 1$
H	Sensibilidad de la medición	$m \times n$
R	Ruido de la medición	$n \times n$

Fuente: (Welch & Bishop, 2001)

Definiendo entonces, \hat{x}_k^{-1} como el estado *a priori*, en un instante k , y \hat{x}_k como el estado *a posteriori* en el instante k dada la medición z_k . Se puede definir entonces, los errores estimados *a priori* e_k^- y *a posteriori* e_k como se expresa en las ecuaciones (2.3) y (2.4):

$$e_k^- = x_k - \hat{x}_k^{-1} \quad (2.3)$$

$$e_k = x_k - \hat{x}_k \quad (2.4)$$

La covarianza *a priori* de la estimación de estados, se calcula como:

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (2.5)$$

Y la covarianza *a posteriori* de la estimación de estados, se calcula como:

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (2.6)$$

Donde E representa el valor esperado. Mediante el algoritmo del Filtro de Kalman se busca una estimación *a posteriori* a partir de una combinación lineal de una estimación *a priori* y la diferencia entre una medición real actual y una predicción de medición. Por lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (2.7)$$

La matriz K de dimensiones $n \times m$ es denominada ganancia Kalman, la cual corrige la incertidumbre ligada a la estimación *a posteriori*. Para hallar el valor de la matriz K, se sustituye la ecuación (2.7) en la ecuación (2.4), y el valor obtenido se

reemplaza en la ecuación (2.6). A continuación se deriva con respecto a K y se iguala a 0, con lo que se obtiene la ecuación (2. 8).

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (2. 8)$$

Se puede observar que la matriz K_k depende de la matriz de covarianza *a priori* P_k^- , por lo que reemplazando la ecuación (2.1), en la ecuación (2.3), y esta a su vez siendo reemplazada en la ecuación (2.5), se obtiene la ecuación (2. 9).

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \quad (2. 9)$$

De la misma manera se obtiene el valor de la matriz de covarianza *a posteriori*.

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (2. 10)$$

En la Tabla 2 se resume las ecuaciones que describen el algoritmo del filtro de Kalman, para las cuales se tiene una estimación inicial de \hat{x}_{k-1} y P_{k-1} .

Tabla 2

Ecuaciones del Algoritmo de Filtro de Kalman

Ecuaciones de la etapa de Predicción	
1) Proyectar el estado hacia adelante	(2. 11)
$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} + B u_k$	
2) Proyectar la covarianza del error hacia adelante	(2. 12)
$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q$	
Ecuaciones de la etapa de Corrección	
1) Calcular la ganancia de Kalman	(2. 13)
$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$	
2) Actualizar la estimación con la medición z_k	(2. 14)
$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$	
3) Actualizar la covarianza del error	(2. 15)
$P_k = (I - K_k H) P_k^-$	

Fuente: (Welch & Bishop, 2001)

2.3.3 Filtro de Kalman en la industria robótica

Los procesos industriales de la actualidad requieren la medición de un gran número de variables físicas para tener suficiente información acerca del proceso y poder ejecutar diversas acciones para el control del mismo. Sin embargo existen algunas variables que no pueden ser medidas debido a la dificultad de acceso o alto costo. Por tanto en el filtro de Kalman resulta de gran utilidad en las aplicaciones de ingeniería para la estimación de las variables de difícil acceso. (Auger, y otros, 2013).

En el campo de la robótica, el Filtro de Kalman es utilizado en aplicaciones de localización y navegación de robots móviles, seguimiento, control de movimiento, estimación de variables, visión artificial, reconstrucción de la estructura de una secuencia de imágenes, entre otros (Chen, 2011). Se utiliza el Filtro de Kalman en la industria para operaciones de ensamblaje para estimar la orientación de la herramienta y su centro de masa (Won , Golnaraghi, & Melek, 2009). En operaciones de interacción entre humano y robot, en la que es indispensable controlar la fuerza con la que actúa el brazo robótico, se aplica el Filtro de Kalman para la estimación de la fuerza de manera que se pueda realizar un control de la potencia de los motores (Mitsantisuk, Katsura, & Ohishi, 2009).

El propósito de implementar el filtro de Kalman en aplicaciones de visión artificial en la robótica, es utilizar mediciones visuales que pueden contener ruido obtenidas por una cámara, con la finalidad de obtener valores cercanos a las mediciones reales. Se utiliza en actividades de calibración robótica para modelado y agarre de objetos basados en visión artificial (Motai & Kosaka, 2008).

2.4 Celda de Trabajo

Una celda de trabajo, conocida también como celda de manufactura es un conjunto de máquinas, materiales, herramientas y personas organizados en una combinación eficiente para realizar un determinado proceso industrial. Permite

maximizar la producción y reducir pérdidas y tiempos de proceso, en la Figura 12 se indica un esquema de una celda de manufactura.

Una celda de trabajo automatizada realiza de forma autónoma las operaciones de un proceso de producción. Se encuentra constituida por robots, máquinas y sistemas de transporte, las cuales están conectados a un controlador central, en el cual se controlan las actividades que realizan cada una de las máquinas que forman parte de la celda (Lorenzo, 2006).

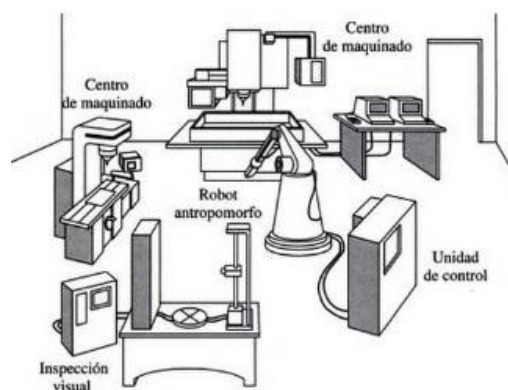


Figura 12 Esquema de una celda de manufactura

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2002)

2.4.1 Disposición de un robot en una celda de trabajo

Una de las consideraciones más importantes en el diseño de una celda de trabajo automatizada es la disposición de un robot dentro de la misma, lo cual depende de los requerimientos del proceso donde va a ser aplicado (Barrientos , Peñin, Balaguer, & Aracil, Fundamentos de Robótica, 2007). Existen 4 disposiciones básicas, que son:

- Robot en el centro de la célula: el robot se ubica de modo que queda rodeado por el resto de elementos de la celda como se puede observar en la Figura 13, es típico de configuraciones de robots cilíndricos, polar y SCARA.

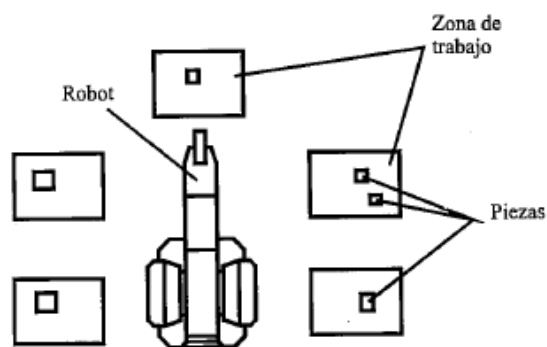


Figura 13 Disposición del robot en el centro de la célula

Fuente: (Barrientos , Peñin, Balaguer, & Aracil, Fundamentos de Robótica, 2007)

- Robot en línea (ver Figura 14): es recomendable cuando el producto debe pasar por varios procesos, por lo que varios robots deben realizar acciones sobre los objetos que se transportan entre cada estación de trabajo.

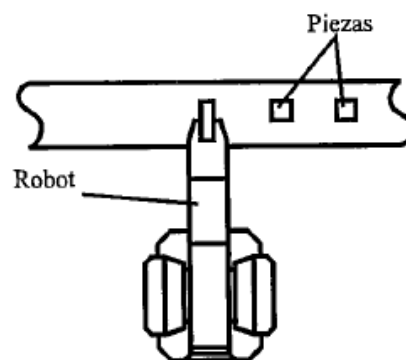


Figura 14 Disposición del robot en línea

Fuente: (Barrientos , Peñin, Balaguer, & Aracil, Fundamentos de Robótica, 2007)

- Robot móvil: el robot se encuentra en una vía que permite su movimiento lineal, con lo que el robot puede seguir a la pieza mientras realiza la acción, de modo que la posición relativa entre la pieza y el robot permanece fija.
- Robot suspendido: el robot se encuentra sobre el área de trabajo. Su principal ventaja es el aprovechamiento del área de trabajo.

2.4.2 Ventajas de una Celda de Trabajo

- Comunicación simplificada entre los elementos de la celda
- Disminución de tiempos de producción
- Aumento de la calidad y productividad
- Flexibilidad en el proceso de producción
- Aumento de la capacidad de producción
- Menor espacio utilizado

2.5 Resumen

El robot SCARA fue creado en la Universidad de Yamanashi- Japón en 1979, comenzó como un robot de 4 grados de libertad. Posteriormente se lanza al mercado robots SCARA comerciales de 3 grados de libertad en 1981. Se caracterizan por ser de accionamiento directo, rápidos, precisos y económicos, lo que los hace ideales para aplicaciones como manejo de materiales, operaciones de ensamblaje, entre otras.

La visión artificial permite al sistema robótico obtener información de su entorno sin la necesidad de interacción física, utilizando imágenes adquiridas mediante una cámara para procesar la información obtenida y ejecutar acciones. Sus principales elementos son: el objeto a identificar, sensor óptico y un ordenador que realice el procesamiento, siendo de gran importancia la iluminación del ambiente en que se encuentra el objeto. Para el reconocimiento de objetos mediante visión artificial se sigue 4 etapas que son: captura, pre proceso, segmentación y reconocimiento. El desarrollo de la visión artificial ha permitido que su campo de aplicación sea amplio, en áreas como robótica móvil, manufactura, medicina, seguridad, entre otras.

El filtro de Kalman es un estimador estadístico lineal basado en técnicas de espacio de estados, es un filtro recursivo de predicción, usado en problemas con una

dinámica lineal y con un ruido blanco. Se divide en dos etapas, predicción y corrección. Consta de: el vector de estado, modelo dinámico y modelo de medición. Tiene un amplio campo de aplicación en robótica para navegación y localización de robots móviles y sistemas de visión por computador.

Una celda de trabajo se constituye de máquinas, materiales, herramientas y personas organizadas en una combinación eficiente para realizar un proceso industrial, de modo que se maximiza la producción y se reducen las pérdidas. Los robots dentro de una celda de trabajo, pueden estar distribuidos en el centro de la celda, en línea, móvil y suspendido.

CAPÍTULO III

DISEÑO CELDA DE TRABAJO PARA EL ROBOT SCARA

El capítulo se centra en el diseño de la celda de trabajo para un robot SCARA. Se empieza realizando la matriz de la calidad para definir las principales necesidades del usuario y sus requerimientos técnicos. Tanto las necesidades como especificaciones ayudan en la elaboración de la estructura funcional y la definición de los subsistemas correspondientes. Se plantean alternativas para el diseño de cada uno de los elementos y se realiza la evaluación de ventajas y desventajas de cada uno para seleccionar la mejor alternativa. Posterior a ello, se realizan los cálculos y dimensionamiento de cada uno de los elementos que formarán parte de la celda de trabajo.

3.1 Matriz de la calidad

En la matriz de la calidad se analizan los requerimientos o necesidades del cliente y se establece los requerimientos funcionales o técnicos, determinando la importancia de cada uno de ellos, de manera que se pueda establecer los subsistemas correspondientes.

3.1.1 Definición de necesidades

Las necesidades son aquellas características requeridas por el usuario, de las cuales se parte para establecer especificaciones funcionales con las que debe cumplir el producto. De esta manera, considera todos los aspectos que permitan realizar un diseño óptimo que cumpla con los requerimientos.

Las necesidades descritas en la Tabla 3 permiten establecer posibles soluciones en la elaboración del proyecto, lo cual se convierte en el punto de partida para el diseño

de la celda de trabajo para el robot SCARA, con la finalidad de plantear diversas alternativas factibles y finalmente seleccionar aquella que permita brindar una solución sencilla, económica y eficiente.

Tabla 3

Requerimientos o necesidades del consumidor

No.	Requerimientos
1	La banda debe trabajar continuamente
2	Resistente a factores externos
3	Alimentación continua de piezas
4	Debe ser económico y eficiente
5	Baja capacidad de carga
6	Debe permitir la interacción con el usuario
7	Facilidad de mantenimiento
8	La banda debe ser de corta longitud
9	Software de control de uso libre
10	Clasificación de objetos por forma y color

3.1.2 Definición de características técnicas

Para el desarrollo de este punto se parte de los requerimientos del consumidor y se define las especificaciones técnicas correspondientes a cada una de ellas. En la Tabla 4 se encuentran las especificaciones técnicas obtenidas a partir de las necesidades planteadas.

Tabla 4

Especificaciones técnicas del proyecto

No.	Requerimientos
1	Velocidad constante de la banda
2	Robusto
3	Intervalo mínimo de alimentación entre piezas
4	Componentes normalizados
5	Material de la banda
6	HMI elaborada de acuerdo a normas
7	Sistema modular
8	Estructura de la banda transportadora
9	Software de programación de acceso libre
10	Sistema de visión artificial

3.1.3 QFD

La función de desarrollo de la calidad “*Quality Function Deployment*”, permite relacionar las necesidades del cliente con las características técnicas que permitan satisfacerlas. Adicionalmente permite determinar la importancia de cada una de ellas con respecto a las demás y se valora subjetivamente el grado de dificultad que implica alcanzarlas, de manera que se pueda obtener el mejor resultado para el producto propuesto (Ficalora & Cohen, 2009).

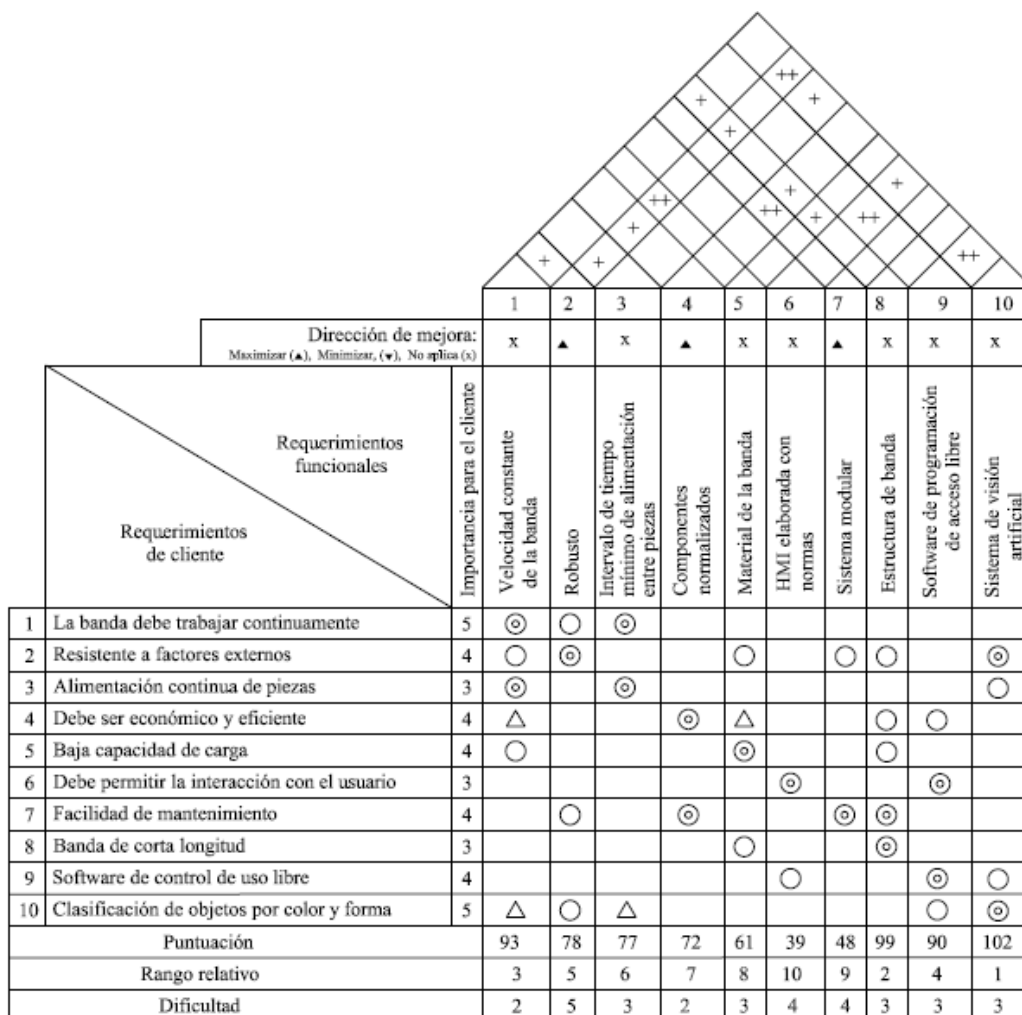


Figura 15 Matriz QFD del proyecto

Para el análisis de las correlaciones que se utiliza la simbología japonesa que se indica en la Tabla 5.

Tabla 5

Escala japonesa de correlación entre requerimientos

Muy Correlacionado	◎	9
Correlacionado	○	3
Poco Correlacionado	△	1
Ninguna		0

Fuente: (Ficalora & Cohen, 2009)

En la Figura 15 se muestra la Matriz QFD, realizada a partir de las necesidades del consumidor y su correlación con los requerimientos técnicos definidos anteriormente. Finalmente, en la Tabla 6 se indican los resultados obtenidos, ordenando cada una de las características técnicas en un rango de mayor a menor, en función de su puntuación.

Tabla 6

Resultados de la matriz QFD

Hito	Características técnicas	Puntuación
1	Sistema de visión artificial	102
2	Estructura de la banda transportadora	99
3	Velocidad de la banda	93
4	Software de programación de acceso libre	90
5	Robusto	78
6	Intervalo mínimo de alimentación entre piezas	77
7	Componentes normalizados	72
8	Material de la banda	61
9	Sistema modular	48
10	HMI elaborada con normas	39

3.2 Factibilidad y planeación

3.2.1 Estructura funcional

Al obtener los resultados de la matriz QFD, se debe agrupar las características técnicas en subsistemas que tengan una finalidad específica, los cuales en conjunto forman la estructura funcional que posee las características con las que debe cumplir el producto final.

La definición de subsistemas permite desglosar la operatividad del mismo en sistemas más pequeños, de manera que al asegurar el funcionamiento adecuado de cada uno, se asegura el correcto funcionamiento del sistema en completo y el cumplimiento de las necesidades propuestas inicialmente por el consumidor. Para el desarrollo de la celda de trabajo para el robot SCARA, se definen los subsistemas especificados en la Tabla 7.

Tabla 7

Subsistemas definidos para el diseño

No.	Subsistema	Funciones	Hitos a cumplir
1	Banda transportadora	Transporte continuo de los objetos a ser clasificados.	1,3,5,6,7,8,9
2	Tarjeta de control	Control del sistema, adquisición de datos, envío y recepción de señales.	3,5,6
3	Sistema de visión artificial	Reconocimiento de formas y colores	2,4,5,10
4	Filtro de Kalman	Predicción de la posición de las piezas	3,4,5,6
5	Interfaz Humano-Máquina	Interacción con el usuario	4,10

El proceso de diseño de un producto según (Ulrich & Eppinger, 2012), presenta dos etapas:

- Diseño Preliminar: en esta etapa se enumeran, evalúan y seleccionan las alternativas de diseño
- Diseño Final: en esta etapa se desarrollan las alternativas seleccionadas. Para el presente proyecto, se consideran el diseño mecánico, electrónico, de control y de software.

3.3 Subsistema 1. Banda Transportadora

En el subsistema denominado banda transportadora se analizan alternativas en lo que se refiere al tipo de banda, material y tensor de la misma de acuerdo a las características que debe tener el producto.

3.3.1 Tipo de banda

El tipo de banda se refiere a la estructura de la misma. Existen varios tipos de bandas transportadoras las cuales pueden ser utilizadas de acuerdo a los requerimientos de longitud de la misma, carga del material a transportar, velocidad, entre otros.

3.3.1.1 Alternativas de diseño

Banda de rodillos

Consiste en una estructura sobre la cual están colocados una serie de rodillos perpendicularmente a la dirección de avance de la banda, los rodillos giran sobre su propio eje mientras se desplaza la carga sobre ellos, como se indica en la Figura 16.

Características:

- Permite transportar grandes cargas.
- Útil para transporte a grandes distancias.
- Se puede utilizar en bandas inclinadas.
- Facilita la transferencia de la carga a otras líneas de distribución.
- Se recomienda su utilización para transportar materiales con superficies lisas.
- Mayor costo en comparación con otros tipos de bandas.



Figura 16 Esquema de banda transportadora de rodillos

Fuentes: (Forbo Movement Systems, 2014)

Banda tipo mesa

La estructura de la banda posee una mesa como base en lugar de rodillos que puede ser metálica o de madera dependiendo de la carga, de manera que se evita el pandeo de la banda (Ver Figura 17).

Características:

- Se utiliza tanto para productos empacados como para mercancías a granel.
- Permite transportar materiales livianos.
- Presenta una estructura de menor tamaño en comparación con la banda de rodillos.
- Tienen poca elongación y evita ajustes posteriores.
- La longitud de la banda es limitada
- La velocidad es limitada
- Se usa normalmente bandas con bajo coeficiente de fricción entre los materiales de la cubierta inferior y la placa deslizante.



Figura 17 Esquema de Banda transportadora tipo mesa

Fuente: (Forbo Movement Systems, 2014)

Banda tipo bisagra

La banda está formada por eslabones tipo bisagra elaborados de acero.

Características:

- Permite trabajar con grandes cargas
- Óptimo para trabajar en ambientes húmedos
- Puede trabajar en altas temperatura

- Alto costo
- Fácil mantenimiento

3.3.1.2 Evaluación y selección de alternativas

De acuerdo con los requerimientos del proyecto se concluye que el tipo de banda más eficiente es la banda tipo mesa. Debido principalmente a factores como:

- Se requiere que la banda trabaje a baja velocidad
- La banda va a transportar bajas cargas
- La longitud de la banda es de 1.2m, lo que se considera corta longitud en el diseño de bandas transportadoras.
- Se requiere que sea económica.

Las alternativas más destacadas del material para la mesa de la banda se describen en la Tabla 8.

Tabla 8

Alternativas de material para la mesa de la banda

	Solución	Características
A	Madera MDF	-Costo: \$10 -Liviana -Ideal para trabajar en ambientes secos -Fácil de cortar y taladrar
B	Acero inoxidable AISI 304	-Costo: \$ 82.6 -Pesado -Ideal en la industria alimenticia y médica -Superficie poco rugosa por lo que presenta un bajo coeficiente de rozamiento con la banda. -Larga vida útil con grandes cargas.
C	Plancha de acero galvanizado	-Costo: \$12 -Liviano -Resistente a la corrosión -No necesita mantenimiento -Larga vida útil con grandes cargas

La siguiente etapa en el diseño es realizar una ponderación de criterios para optimizar la selección. La Tabla 9 presenta dicha ponderación teniendo un mayor valor el criterio más importante a tomar en cuenta para la selección.

Tabla 9

Ponderación de criterios de evaluación para el material de la mesa de la banda

Criterio	Costo	Peso	Maquinabilidad	Implementación	$\sum+1$	Pond.
Costo	-	5	2.5	2.5	11	0.32
Peso	0	-	5	2.5	8.5	0.25
Maquinabilidad	2.5	0	-	2.5	6	0.18
Implementación	2.5	2.5	2.5	-	8.5	0.25
Total:					34	1.00

A continuación se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 10, Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13) y finalmente, de acuerdo a las ponderaciones alcanzadas se selecciona una de las alternativas planteadas.

Tabla 10

Ponderación de costos para las alternativas del material de la mesa de la banda

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	5	11	0.61
Solución B	0	-	0	1	0.05
Solución C	0	5	-	6	0.34
Total:				18	1.00

Tabla 11

Ponderación de peso para las alternativas del material de la mesa de la banda

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	0	6	0.34
Solución B	0	-	0	1	0.05
Solución C	5	5	-	11	0.61
Total:				18	1.00

Tabla 12

Ponderación de maquinabilidad para alternativas del material de la mesa de la banda

Maquinabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	2.5	2.5	6	0.333
Solución B	2.5	-	2.5	6	0.333
Solución C	2.5	2.5	-	6	0.333
Total:				18	1.00

Tabla 13

Ponderación de implementación para alternativas del material de la mesa de la banda

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	0	0	1	0.056
Solución B	5	-	2.5	8.5	0.47
Solución C	5	2.5	-	8.5	0.47
Total:				18	1.00

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 14, se selecciona la solución con la prioridad 1, por ser la que cumple de mejor manera los criterios planteados. Por tanto se selecciona la plancha de tol galvanizado como material para la mesa de la banda transportadora.

Tabla 14

Conclusión en la selección de diseño para el material de la mesa de la banda

	Costo	Peso	Maquinabilidad	Implementación	\sum	Prioridad
Solución A	0.195	0.085	0.06	0.014	0.354	2
Solución B	0.016	0.013	0.06	0.118	0.207	3
Solución C	0.109	0.153	0.06	0.118	0.448	1
Total:					1.00	

3.3.2 Material de la banda

La selección del material de la banda es de vital importancia para el desempeño correcto del sistema. La duración de la banda depende en un gran porcentaje del material seleccionado y las características del material a transportar.

3.3.2.1 Alternativas de diseño

La carcasa consiste en una o más capas de tejido que se encargan de transmitir las fuerzas de tensión del rodillo motriz y absorber el impacto producido por la carga de material en la banda. De acuerdo con la disponibilidad de distribuidores nacionales (Bandas & Bandas S.A.), se tiene diversos tipos de carcasas para bandas los cuales se enlistan a continuación:

Carcasa con tejido sintético

Contiene fibras de poliéster que se encuentran ubicadas en dirección longitudinal y de poliamida en dirección transversal, de modo que se aprovecha las propiedades de ambos materiales.

Características:

- Inmune a efectos de microorganismos y humedad
- Gran flexibilidad y buen seguimiento de poleas
- Baja elongación a altas tensiones de trabajo.
- Alta resistencia en proporción al peso
- Alta resistencia a impacto.

Carcasa con alma de acero

Contiene cables de acero en forma de una capa extra, de modo que se protege el tejido de Poliéster/Poliamida de cortes longitudinales.

Características:

- Útil para condiciones severas de trabajo.
- Tensiones de operación superior a carcasa tejidas.
- Ideal para instalaciones con recorrido limitado del tensor.

3.3.2.2 Evaluación y selección de alternativas

De acuerdo con los requerimientos del proyecto se concluye que el material de banda más adecuado es la carcasa de tejido sintético. Debido principalmente a factores como:

- Se requiere que la banda sea flexible a temperatura ambiente
- La banda va a transportar bajas cargas
- La banda debe ser fácil de instalar

Las cubiertas protegen la carcasa y proveen la fricción necesaria entre la banda y el rodillo motriz y entre la banda y el material a transportar. Las alternativas más destacadas y utilizadas a nivel industrial se describen en la Tabla 15.

Se realiza la ponderación de criterios para optimizar la selección. La Tabla 16, presenta dicha ponderación teniendo en cuenta los criterios importantes para la selección. A continuación se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19) y finalmente, de acuerdo a las ponderaciones alcanzadas se selecciona una de las alternativas planteadas.

Tabla 15

Alternativas del material de la cubierta de la banda




Solución	Imagen	Características
A Caucho		<ul style="list-style-type: none"> -Costo: \$147 -Gran capacidad de carga -Alta resistencia al desgaste -Buena resistencia a la intemperie -Soporta alto grado de abrasión -Resistente a fuego , aceite y químicos -Larga vida útil
B PVC		<ul style="list-style-type: none"> -Costo: \$ 73.5 -Alta flexibilidad a temperatura ambiente -Antiestático -Baja elongación -Apto para la manipulación de alimentos -Fácil de instalar -Resistencia al agua y al vapor -Limitada resistencia a aceites y grasas
C Poliolefina		<ul style="list-style-type: none"> -Costo: \$ 124.95 -Buenas propiedades antiadherentes -Rango de temperatura limitado (-30 a 65oC) -Baja flexibilidad -Es utilizada comúnmente en la industria alimenticia

Tabla 16

Ponderación de criterios de evaluación para el material de la banda

Criterio	Costo	Carga	Implementación	$\Sigma+1$	Pond.
Costo	-	5	2.5	8.5	0.48
Carga	0	-	2.5	3.5	0.19
Implementación	2.5	2.5	-	6	0.33
				Total: 18	1.00

Tabla 17

Ponderación de costos para las alternativas del material de la banda

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond.
Solución A	-	0	0	1	0.056
Solución B	5	-	5	11	0.61
Solución C	5	0	-	6	0.33
				Total: 18	1.00

Tabla 18

Ponderación de la carga para las alternativas del material de la banda

Carga	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond.
Solución A	-	5	5	11	0.61
Solución B	0	-	2.5	3.5	0.195
Solución C	0	2.5	-	3.5	0.195
				Total: 18	1.00

Tabla 19

Ponderación de implementación para las alternativas del material de la banda

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond.
Solución A	-	0	0	1	0.06
Solución B	5	-	2.5	8.5	0.47
Solución C	5	2.5	-	8.5	0.47
				Total: 18	1.00

Tabla 20

Conclusión en la selección de diseño para el material de la banda

	Costo	Carga	Implementación	Σ	Prioridad
Solución A	0.027	0.116	0.019	0.162	3
Solución B	0.293	0.037	0.155	0.485	1
Solución C	0.158	0.037	0.155	0.353	2
				Total: 1.00	

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 20, se selecciona la solución con la prioridad 1, por ser la que cumple de mejor manera los criterios planteados. Por tanto se selecciona la banda de PVC color negro BREDA B20FF (ESBELT, 2013). La cual presenta las características que se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21

Características técnicas de la banda de PVC BREDA B20FF

Característica	Valor
Cobertura superior	
Material	PVC
Color	Negro
Acabado	Tejido
Cobertura Inferior	
Material	
Color	Crudo
Acabado	Tejido
Temperatura de trabajo	-5 a 80 °C
Número de telas	2
Trama	Rígida
Espesor	2.4 mm
Peso	2.70 kg/m ²
Carga de rotura	190 N/mm

Fuente: (ESBELT, 2013)

3.3.3 Sistema de tensionamiento de la banda

Un sistema de tensionamiento tiene como objetivo asegurar que el rodillo motriz mueva el material que se encuentra sobre la banda, mediante la aplicación de una pre-tensión en la misma.

3.3.3.1 Alternativas de diseño

Sistema de ajuste por tornillo

Es un sistema de tensionamiento fijo, se usan en bandas cortas ($L \leq 50$ m) y de baja capacidad de carga. (Ver Figura 18)



Figura 18 Sistema de ajuste por tornillo
Fuente: (Forbo Movement Systems, 2014)

Sistema de autoajuste

Mantiene la pre-tensión constante y asegura que la tensión máxima permisible de la banda no sea excedida, se recomienda para bandas de grandes longitudes. Existen dos tipos de sistemas de auto ajuste: Mediante actuadores eléctricos, neumáticos, etc., y autoajuste por gravedad. (Ver Figura 19.)

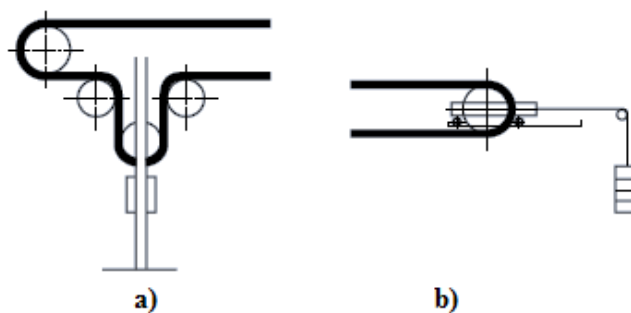


Figura 19 Sistemas de autoajuste: a) sistema de autoajuste mediante actuadores eléctricos, neumáticos o electro hidráulicos. b) sistema de autoajuste por gravedad

Fuente: (Forbo Movement Systems, 2014)

3.3.3.2 Evaluación y selección de alternativas

De acuerdo con los requerimientos del proyecto se concluye que el sistema de tensionamiento de la banda más adecuado es el ajuste por tornillo. Debido principalmente a factores como:

- La banda es de corta longitud
- La banda va a transportar bajas cargas

3.3.4 Diseño final de la Banda transportadora

3.3.4.1 Diseño mecánico de la Banda transportadora

Para realizar el diseño de una banda transportadora es necesario considerar ciertos parámetros técnicos que son indispensables y los cuales se utilizan para realizar los cálculos. Los parámetros más importantes a tener en cuenta son:

- Material que se va a transportar: la selección del tipo de banda depende de las características del material a transportar como su abrasividad, temperatura y corrosividad. Adicionalmente permite definir la capacidad requerida por la banda transportadora.
- Trayectoria de la banda: la trayectoria de la banda consiste en la distancia entre el punto de alimentación del material hasta el punto de descarga de la banda. Se trata de la distancia entre centros del rodillo motriz y rodillo de cola.
- Velocidad de la banda transportadora: la velocidad es uno de los parámetros más importantes ya que interviene directamente en la tensión resultante en la banda y la potencia necesaria para el movimiento de la misma.

Cálculo del ancho de banda

Para calcular el ancho de banda se utiliza la ecuación (3.1):

$$B \cong \text{longitud máxima de cara} + 100 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Las figuras a ser transportadas por la banda están inscritas en un cuadrado de 100mm de lado como se indica en la Figura 20 . Se considera entonces la hipotenusa de la figura como la longitud máxima de cara.

$$\text{longitud max. cara} = \sqrt{100^2 + 100^2} = 141.42 \text{ mm}$$

$$B \cong 141.24 \text{ mm} + 100 \text{ mm} = 241.42 \text{ mm}$$

De acuerdo con valores comerciales de anchos de banda, se define $B = 300 \text{ mm}$.

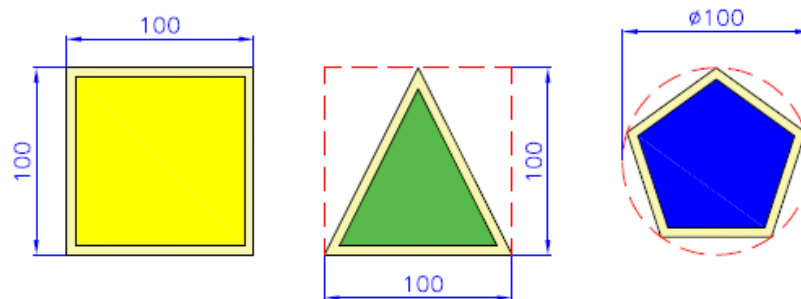


Figura 20 Figuras a ser transportadas por la banda

Cálculo de la velocidad de la banda

Para calcular la velocidad necesaria de la banda se utiliza la siguiente ecuación:

$$v = \frac{l + a}{t} \quad (3.2)$$

Dónde:

v = Velocidad de la banda (m/s)

l = Longitud de la pieza (m)

a = Espacio entre piezas (m)

t = Intervalo de carga (s)

Las variables l y a se muestran en la Figura 21.

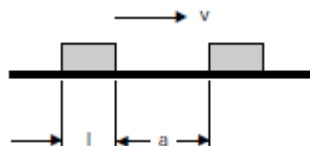


Figura 21 Variables para el cálculo de la velocidad de la banda

Fuente: (DUNLOP, 2004)

$$v = \frac{0.14m + 0.3m}{3 s} = 0.15 \text{ m/s}$$

Para los cálculos, se considera 0.15 m/s como la velocidad máxima a la que trabajará la banda, esta velocidad variará en función de los requerimientos y las limitaciones del robot.

Cálculo de la capacidad de transporte:

La capacidad de transporte de la banda se expresa en toneladas por hora (ton/h) y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación (DUNLOP, 2004):

$$Q_t = 3600 \cdot v \cdot A \cdot \rho \cdot k \quad (3.3)$$

Dónde:

Q_t = Capacidad de la banda (ton/h)

A = Área transversal del material a transportar (m^2)

ρ = Densidad (ton/m^3)

k = Factor por inclinación de banda

Se calcula en conjunto los términos $A \cdot \rho$ de la ecuación (3.3), debido a que el objeto a ser transportado por la banda está conformado por dos tipos de materiales: balsa y tol como se indica en la Figura 22 .

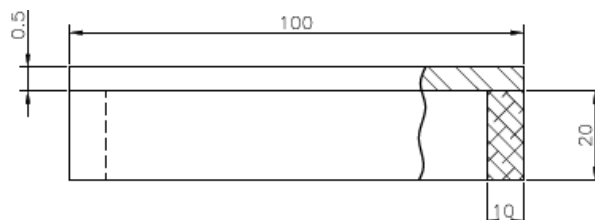


Figura 22 Área transversal del objeto a transportar

Se calcula el área de cada material:

$$A_{tol} = 100mm \times 0.5mm = 50mm = 5 \times 10^{-5} m^2$$

$$A_{balsa} = 100mm \times 20mm = 2000mm = 2 \times 10^{-3} m^2$$

Se considera las densidades de cada uno de los materiales para realizar el cálculo:

$$\rho_{balsa} = 0.176 \text{ ton}/m^3 \quad (\text{ECOBALSA, 2004})$$

$$\rho_{tol} = 8.65 \text{ ton}/m^3 \quad (\text{Ferdinand , Johnston, DeWolf, \& Mazurek., 2011})$$

$$A \cdot \rho = A_{balsa} \cdot \rho_{balsa} + A_{tol} \cdot \rho_{tol}$$

$$A \cdot \rho = 7.85 \times 10^{-4} \text{ ton}/m$$

Se calcula el factor de inclinación de la banda con la ecuación (3. 4) (DUNLOP, 2004), considerando que la banda a ser diseñada es de tipo horizontal y por tanto no posee inclinación.

$$k = 1 - 1.64 \left(\frac{\emptyset - \pi}{180} \right)^2 \quad (3. 4)$$

Dónde:

k = Factor por inclinación de banda

\emptyset = Ángulo de inclinación de banda en grados

A partir de la ecuación (3. 4) y con $\emptyset = 0^\circ$, se obtiene $k = 1$. Se reemplaza en la ecuación (3. 3) los datos obtenidos anteriormente y se obtiene:

$$Q_t = 3600 \cdot 0.15 \cdot (7.84 \times 10^{-4}) \cdot 1$$

$$Q_t = 0.424 \text{ ton}/h$$

Esta es la capacidad máxima calculada para la banda, por tanto la capacidad requerida para que la banda opere continuamente debe ser menor.

Cálculo de las fuerzas en la banda:

La fuerza requerida para que una banda mueva un material desde un punto A hasta un punto B debe ser calculada tomando en cuenta 3 consideraciones:

- La fuerza necesaria para mover la banda y los componentes que giran por ella sin carga.
- La fuerza necesaria para desplazar la carga.
- La fuerza necesaria para elevar o bajar la carga.

Para calcular la fuerza necesaria para mover la banda y los componentes que giran por ella sin carga, se utiliza la ecuación (3. 5) (ROULUNDS, 2001):

$$F_1 = (C \cdot f \cdot L \cdot G) \cdot g \quad (3. 5)$$

Dónde:

F_1 = Fuerza para mover la banda en vacío (N)

C = Factor de fricción por longitud de banda

f = Factor de fricción de las partes móviles

L = Longitud total de la banda (proyección horizontal) (m)

G = Peso de las partes móviles (kg/m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Es necesario considerar ciertas fuerzas de fricción en las bandas, tales como la fricción en las chumaceras, inercia de los rodillos, etc., las cuales se denominan resistencias secundarias, por lo que según la norma DIN 22101 es necesario considerar un factor C de fricción por longitud de banda.

$$C = 15.9 \cdot L^{-0.61} + 0.77 \quad (3. 6)$$

Dónde:

L = Longitud total de la banda (m)

Considerando la longitud total de la banda $L = 1.2 \text{ m}$, se calcula C según la ecuación (3. 6), obteniendo un valor de $C = 15$

El coeficiente de fricción f de las partes móviles varía en función del tipo de rodillos empleados, la estructura de la banda y el mantenimiento del sistema. En la Tabla 22 se muestra los coeficientes de fricción de las partes giratorias según las condiciones de funcionamiento.

Tabla 22

Coeficiente de fricción de las partes giratorias (f)

Condición	Coeficiente f
Buenos transportadores con rodillos de marcha suave y pequeña fricción interna en el material	0.017
Valor standard para bandas transportadoras con ambiente normal de trabajo	0.020
Condiciones de marcha desfavorables, operación polvosa, sobrecargas periódicas	0.023-0.030
Transportadores descendentes que requieren frenado de motor	0.012

Fuente: (ROULUNDS, 2001)

Considerando que la banda transportadora estará diseñada para trabajar en un ambiente normal de trabajo, se toma un factor $f = 0.020$.

Al considerar el peso de las partes móviles, se consideran todos los elementos que se mueven por acción de la banda transportadora por lo que se usa la ecuación (3.7) (ROULUNDS, 2001):

$$G = 2G_b + \frac{G_{ro}}{S_1} + \frac{G_{ru}}{S_2} \quad (3.7)$$

Dónde:

G = Peso de las partes móviles (kg/m)

G_b = Peso de la banda (kg/m)

G_{ro} = Peso de los rodillos superiores (kg)

S_1 = Espaciamiento entre rodillos superiores (m)

G_{ru} = Peso de los rodillos inferiores (kg)

S_2 = Espaciamiento entre rodillos inferiores (m)

Según la Tabla 21, el peso de la banda es 2.70 kg/m^2 . Para obtener el peso de la banda por unidad de longitud se multiplica por el ancho de la banda.

$$G_b = 2.70 \text{ kg/m}^2 \times 0.3\text{m} = 0.81 \text{ kg/m}$$

Debido a que la longitud de la banda es pequeña, no se utilizan rodillos en la parte inferior (de retorno) por lo que se considera $G_{ru} = 0 \text{ kg}$. y únicamente como rodillo móvil se considera el rodillo de cola de la banda transportadora con un valor de $G_{ro} = 3 \text{ kg}$. Reemplazando los datos en la ecuación (3. 7), se obtiene:

$$G = 2(0.81 \text{ kg/m}) + \frac{3}{1.2\text{m}} = 4.12 \text{ kg/m}$$

Una vez obtenidos todos los valores requeridos en la ecuación (3. 5), se calcula el valor de la fuerza F_1

$$F_1 = (15 \times 0.02 \times 1.2 \text{ m} \times 4.12 \text{ kg/m}) \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 14.55 \text{ N}$$

La fuerza necesaria para desplazar la carga, es aquella que se requiere para vencer la inercia del material y desplazarlo. Para calcular esta fuerza se utiliza la ecuación (3. 8) (ROULUNDS, 2001):

$$F_2 = \left(\frac{C \cdot f \cdot L \cdot Q_t}{3.6 \cdot v} \right) \cdot g \quad (3. 8)$$

Dónde:

F_2 = Fuerza para desplazar la carga (N)

C = Factor de fricción por longitud de banda

f = Factor de fricción de las partes móviles

Q_t = Capacidad máxima de transporte (ton/h)

$$F_2 = \left(\frac{15 \times 0.02 \times 1.2 \text{ m} \times 0.424 \text{ ton/h}}{3.6 \times 0.15 \text{ m/s}} \right) \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 2.77 \text{ N}$$

Por último, es necesario considerar la fuerza para elevar o bajar el material, para lo que se utiliza la ecuación (3. 9).

$$F_3 = \left(\frac{H \cdot Q_t}{3.6 \cdot v} \right) \cdot g \quad (3. 9)$$

Dónde:

F_3 = Fuerza para desplazar verticalmente la carga (N)

H = Altura de elevación de la carga (m)

Para el diseño de esta banda transportadora se tiene $H = 0 \text{ m}$ debido a que se trata de una banda horizontal, la cual no posee ninguna inclinación, por tanto $F_3 = 0 \text{ N}$.

Cálculo de la potencia requerida por la banda:

Para el cálculo de la potencia total requerida por la banda considera: la potencia necesaria para desplazar el material y potencias adicionales generadas por las guías de la banda, entre otros. La potencia teórica requerida se calcula de acuerdo a la ecuación (3.10) (ROULUNDS, 2001):

$$P = \frac{(F_1 + F_2 + F_3) \cdot v}{1000} + P_s \quad (3. 10)$$

Dónde:

P = Potencia teórica (kW)

F_1 = Fuerza para mover la banda en vacío (N)

F_2 = Fuerza para desplazar horizontalmente la carga (N)

F_3 = Fuerza para desplazar verticalmente la carga (N)

P_s = Potencia adicional por guías (kW)

Para calcular la potencia adicional por guías se utiliza la ecuación (3. 11):

$$P_s = 0.08 \cdot v \cdot l \quad (3. 11)$$

Dónde:

P_s = Potencia adicional por guías (kW)

l = Longitud total de las guías (m)

$$P_s = 0.08 \times 0.15 \text{ m/s} \times 1.2\text{m} = 0.014 \text{ kW}$$

Se reemplaza en la ecuación (3. 10) el valor obtenido de P_s

$$P = \frac{(14.55 \text{ N} + 2.77 \text{ N} + 0 \text{ N}) \times 0.15 \text{ m/s}}{1000} + 0.014 \text{ kW}$$

$$P = 0.0166 \text{ kW} = 16.6 \text{ W}$$

Para el cálculo de la potencia definitiva, se debe considerar pérdidas mecánicas debido a la utilización de mecanismos para transmitir el movimiento del motor a la banda. Adicionalmente se debe considerar pérdidas por la eficiencia del motor, por tanto la potencia definitiva se calcula como:

$$P_T = \frac{P}{\eta \varepsilon} \quad (3. 12)$$

Dónde:

P_T = Potencia requerida para mover la banda (kW)

P = Potencia teórica del motor (kW)

η = Eficiencia del motor

ε = Eficiencia mecánica de la transmisión

Para la eficiencia mecánica de la transmisión, se considera el tipo de transmisión que se va a realizar entre el motor y la banda, el cual se toma de la Tabla 23. Para este diseño se tomará el valor de reductores de engranes rectos $\varepsilon = 0.9$.

Tabla 23

Eficiencias mecánicas de equipos reductores de velocidad

Tipo de reducción	Eficiencia (%)
Poleas y bandas en V	94%
Catalina y cadena de rodillos	93%
Catalina y cadena de rodillos, lubricados en aceite	95%
Reductor de engranes helicoidales, una reducción	95%
Reductor de engranes helicoidales, doble reducción	94%
Reductor de engranes helicoidales, triple reducción	93%
Reductor de tornillo sin fin (ratio 20:1)	90%
Reductor de tornillo sin fin (ratio 20:1 a 60:1)	70%
Reductor de tornillo sin fin (ratio 60:1 a 100:1)	50%
Reductor de engranes rectos (maquinados)	90%

Fuente: (Conveyor Equipment Manufacturers Association CEMA, 2002)

La eficiencia de un motor eléctrico se puede estimar en un rango entre 80% y 95% (DUNLOP, 2004), por lo que se selecciona un valor de $\eta = 0.85$.

$$P_T = \frac{16.6 \text{ W}}{0.85 \times 0.9} = 21.7 \text{ W}$$

De acuerdo con motores DC disponibles en el mercado, se selecciona un motor comercial BOSCH CEP 12V 24W/28W (Ver Figura 23). El motor seleccionado presenta las características que se indican en la Tabla 24.



Figura 23 Motor BOSCH CEP 12V

Fuente: (BOSCH, 2016)

Tabla 24

Características técnicas del motor BOSCH CEP 12V

Característica	Valor
Voltaje de operación	12 V
Potencia	24W/28W
Velocidad de trabajo	26rpm /43rpm
Corriente de trabajo	7 A/ 9A
Torque nominal	8 Nm/ 6.5 Nm
Reducción	63:1

Fuente: (BOSCH, 2016)

Cálculo de las tensiones de la banda:

Para que se produzca el movimiento de la banda, debe existir una diferencia de tensiones en los lados del rodillo motriz. La mayor tensión es conocida como tensión del lado ajustado T_1 , mientras que la menor tensión T_2 es conocida como tensión del lado flojo. La diferencia entre las dos tensiones se llama tensión efectiva T_e y es la que realiza el trabajo de movimiento. En la Figura 24 se muestran las tensiones mencionadas anteriormente.

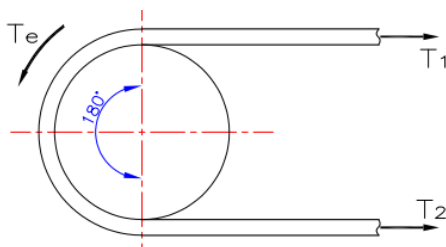


Figura 24 Tensiones de la banda

$$T_e = \frac{1000 \cdot P_T}{v} \quad (3.13)$$

Dónde:

T_e = Tensión efectiva (N)

P_T = Potencia requerida para mover la banda (kW)

v = Velocidad de la banda (m/s)

$$T_e = \frac{1000 \cdot 0.022 \text{ kW}}{0.15} = 146.67 \text{ N}$$

A partir de la tensión efectiva se calcula la tensión del lado ajustado T_1 , con la ecuación (3.14) (DUNLOP, 2004):

$$T_1 = T_e \cdot m \quad (3.14)$$

Dónde:

T_1 = Tensión del lado ajustado (N)

m = Coeficiente de accionamiento

El valor de m depende del ángulo de contacto entre la banda y el rodillo motriz y si el rodillo es revestido o no.

$$m = 1 + \left(\frac{1}{e^{\mu \cdot \theta \cdot \frac{\pi}{180}} - 1} \right) \quad (3.15)$$

Dónde:

μ = Coeficiente de fricción entre el tambor y la banda

θ = Ángulo de contacto entre la banda y el rodillo en grados

El valor del coeficiente de fricción entre el tambor y la banda, considerando un tambor sin recubrimiento y seco es $\mu = 0.35$ (ROULUNDS, 2001).

$$m = 1 + \left(\frac{1}{e^{0.35 \cdot 180 \cdot \frac{\pi}{180}} - 1} \right) = 1.5$$

$$T_1 = 146.67 \text{ N} \times 1.5 = 220 \text{ N}$$

Cuando se implementa un tensor manual para la banda, la fuerza T_1 es incrementada en un 20% (DUNLOP, 2004).

$$T_1 = 220 \text{ N} + 0.2 \times 220 \text{ N} = 264 \text{ N}$$

La tensión del lado flojo T_2 , se calcula por sumatoria de fuerzas, según la ecuación (3. 16)

$$T_2 = T_1 - T_e \quad (3. 16)$$

$$T_2 = T_1 - T_e = 264 - 146.67 = 117.33 \text{ N}$$

Por último se calcula la tensión de trabajo unitaria, que es la tensión máxima a la que será sometida la banda transportadora por mm de ancho de banda, se la obtiene con la ecuación (3.17) (DUNLOP, 2004):

$$T_u = \frac{T_1}{1000 \cdot B} \quad (3. 17)$$

Dónde:

T_u = Tensión unitaria (N/mm)

T_1 = Tensión del lado ajustado (N)

B = Ancho de banda (m)

$$T_u = \frac{264}{1000 \times 0.3} = 0.88 \text{ N/mm}$$

Para la selección de bandas se recomienda la utilización de un factor de seguridad entre 8 y 10 (DUNLOP, 2004), por lo que se selecciona un factor de seguridad $s = 10$. Por tanto:

$$T_N = s \cdot T_u \quad (3.18)$$

Dónde:

$T_N =$ Carga de rotura (N/mm)

$s =$ Factor de seguridad

$T_u =$ Tensión unitaria (N/mm)

$$T_N = 10 \times 0.88 = 8.8 \text{ N/mm}$$

Comprobación de la resistencia de la banda

De acuerdo con la Tabla 21, la resistencia de la banda a la rotura es 160 N/mm, y considerando la carga de rotura calculada anteriormente se calcula el factor de seguridad s .

$$s = \frac{190 \text{ N/mm}}{8.8 \text{ N/mm}} = 21.59$$

Se obtiene un factor de seguridad de 21.59 por lo que se acepta la banda seleccionada.

Diseño de los rodillos

Para el diseño de la estructura de la banda, el diámetro del tambor motriz D_m es igual al diámetro del tambor de cola D_c , debido a que es una banda de corta longitud y no se utilizaran rodillos inferiores.

Para seleccionar el diámetro de los rodillos motriz y de cola, según recomendación del fabricante (Bandas & Bandas S.A.), considerando el ancho de la

banda igual a 300 mm y un espesor de 2.4 mm. Se recomienda que el diámetro del rodillo sea de 76.2 mm [3 pulg].

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




Según el distribuidor (Bandas & Bandas S.A.), para la fabricación de los rodillos se utiliza acero ASTM A53, el cual presenta las siguientes propiedades (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2008):

- Límite de fluencia: 205 MPa
- Resistencia a la tracción: 330MPa

Se realiza un análisis CAE, para comprobar la resistencia del tambor motriz a las cargas que será sometido, como se indica en la Figura 25 y Figura 26, cuya simbología se expresa en la Tabla 25.

Tabla 25

Simbología de las fuerzas

Fuerzas en lado tenso de la banda	
Fuerzas en lado flojo de la banda	
Torsión	

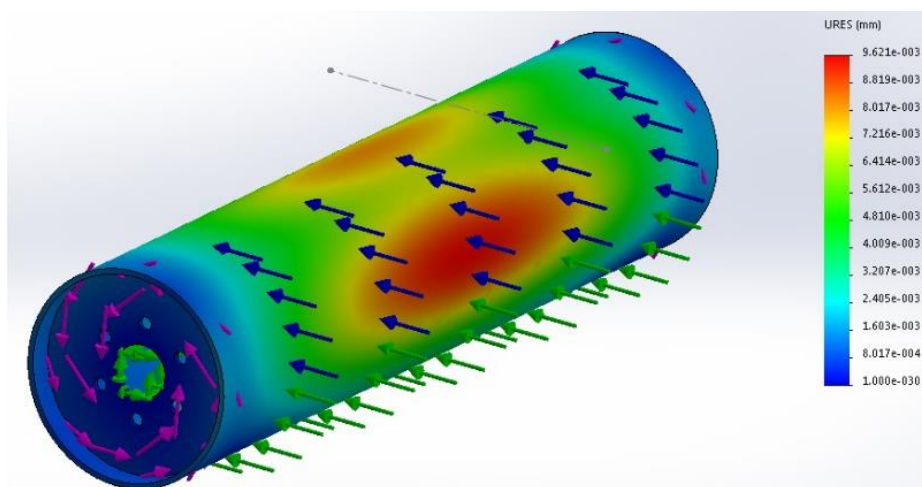


Figura 25 Deformaciones del rodillo motriz

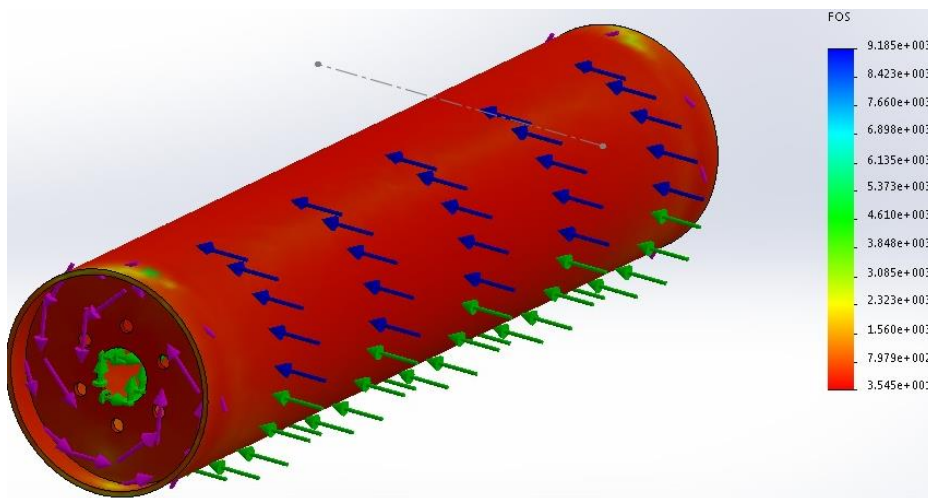


Figura 26 Factor de seguridad del rodillo

Se tiene un factor de seguridad mínimo de 35, por lo que se puede asegurar que el rodillo soportará las cargas a la que será sometido. No se realiza el análisis del rodillo de cola debido a que posee las mismas dimensiones que el motriz, pero el rodillo motriz presenta las condiciones más críticas.

Una vez comprobada la resistencia del rodillo a las cargas, se calcula la velocidad angular requerida para mover la banda a una velocidad $v = 0.15 \text{ m/s}$ con la ecuación (3.19).

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (3.19)$$

Donde:

ω = Velocidad angular (rad/s)

r = Radio del tambor (m)

Como el diámetro del tambor es 76.2 mm, se obtiene $r = 38.1 \text{ mm}$,

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

$$n = 3.94 \text{ rad/s} = 37.6 \text{ rpm}$$

Se inicia con el dimensionamiento de los elementos del rodillo motriz, para lo que se considera la Figura 27.

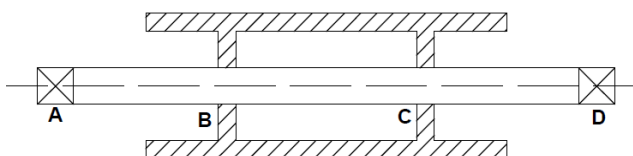


Figura 27 Esquema del tambor motriz

Para el dimensionamiento del eje se realiza el análisis de fuerza cortante, momento flector y torque, de acuerdo a las cargas a las que será sometido. Se parte del diagrama de cuerpo libre del eje mostrado en la Figura 28, teniendo como datos: $T_1 = 264 \text{ N}$, $T_2 = 117.33 \text{ N}$ y $q_t = 19.78 \text{ N}$ y potencia del motor $P_T = 22 \text{ W}$.

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

$$T_1 + T_2 = 381.33 \text{ N}$$

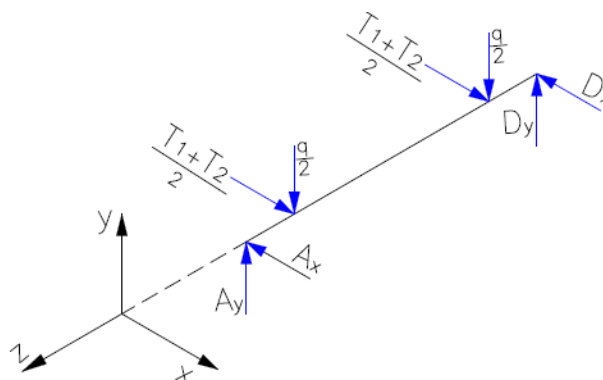


Figura 28 Diagrama de cuerpo libre de la barra

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

$$A_x = D_x = \frac{T_1 + T_2}{2} = 190.67 \text{ N}$$

A partir de los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la Figura 29, se calcula el momento total máximo.

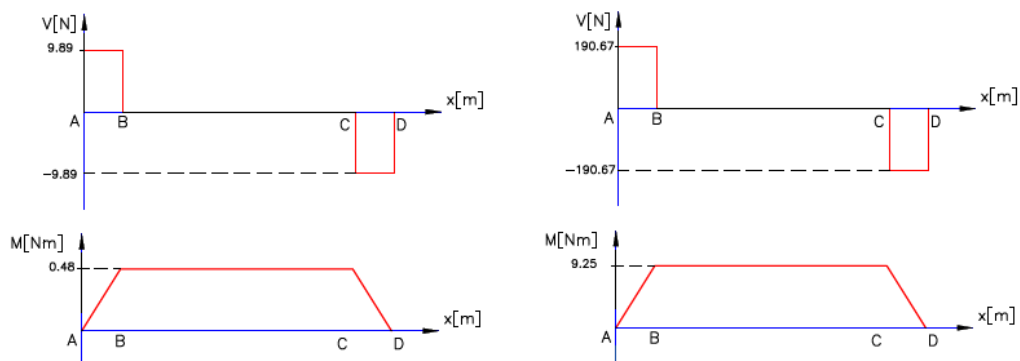


Figura 29 Diagramas de fuerza cortante y momento flector del eje del tambor motriz

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

$$M_{Bxz} = M_{Cxz} = 190.67 \text{ N} \times 0.0485 \text{ m} = 9.25 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{máximo}} = \sqrt{M_{Byz}^2 + M_{Bxz}^2} = \sqrt{0.48^2 + 9.25^2} = 9.26 \text{ Nm}$$

Para calcular el torque se utiliza la ecuación (3.20).

$$T = \frac{P_T}{n} \quad (3.20)$$

Donde:

T = Torque (Nm)

P_T = Potencia requerida del motor (W)

n = Velocidad angular (rad/s)

$$T = \frac{22 \text{ W}}{3.94 \text{ rad/s}} = 5.58 \text{ Nm}$$

Para el cálculo del diámetro del eje del rodillo motriz, se realiza el análisis de falla por fatiga del eje, por lo que se utiliza el criterio de ED-Goodman (Budynas & Nisbett, 2008), como se indica en la ecuación (3.21).

$$d = \left(\frac{16 \cdot s}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f \cdot M_a)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f \cdot M_m)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (3.21)$$

Dónde:

d = Diámetro del eje (m)

s = Factor de seguridad

S_e = Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina (Pa)

S_{ut} = Resistencia última a la tensión (Pa)

K_f = Factor de concentración de esfuerzo por fatiga por flexión

K_{fs} = Factor de concentración de esfuerzo por fatiga por cortante

M_a = Momento alternante (Nm)

T_a = Torque alternante (Nm)

M_m = Momento medio (Nm)

T_m = Torque medio (Nm)

Para el diseño del eje, se utiliza acero AISI 1020, según información obtenida de proveedores (Bandas & Bandas S.A.), el cual presenta las siguientes propiedades (Budynas & Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 2008):

- Límite de fluencia: 210 MPa
- Resistencia a la tracción: 380 MPa

Para calcular el factor S_e se utiliza la ecuación (3.22)

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (3.22)$$

Dónde:

S'_e = Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria (MPa)

k_a = factor de modificación de condición superficial

k_b = factor de modificación de tamaño

k_c = factor de modificación de carga

k_d = factor de modificación de temperatura

k_e = factor de modificación de confiabilidad

El factor de superficie k_a depende de la calidad del acabado de la superficie y de la resistencia a la tensión.

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (3.23)$$

Dónde:

S_{ut} = Resistencia última a la tensión (MPa)

a y b = Constantes que dependen del acabado superficial. (Tabla 6-2. Octava edición (Budynas & Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 2008)).

$$k_a = 4.51 \times 380^{-0.265} = 0.93$$

El factor de tamaño para flexión y torsión k_b , puede expresarse como:

$$k_b = \begin{cases} (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.24)$$

Para la primera iteración se toma $k_b = 0.9$, el cual debe ser verificado después de hallar el diámetro del eje. De acuerdo a las condiciones de trabajo del eje las demás constantes se definen como $k_c = k_d = k_f = 1$

El factor de confiabilidad k_e , se define para obtener una confiabilidad de 95% (Tabla 6-5. Octava edición (Budynas & Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 2008)). $k_e = 0.868$

En el caso de aceros, se estima el límite de resistencia a la fatiga como se indica en la ecuación (3.25):

$$S'_e = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 1400 \text{ Mpa} \\ 700 \text{ Mpa} & S_{ut} > 1400 \text{ Mpa} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut} = 0.5 \times 380 \text{ MPa} = 190 \text{ MPa}$$

$$S_e = 0.93 \times 0.9 \times 0.868 \times 190 \text{ MPa} = 138.04 \text{ MPa}$$

Para el diseño se toma un factor de seguridad $s = 2$. Considerando que el momento máximo se encuentra en el centro del eje, en la cual no hay cambios de sección, se define K_f y $K_{fs} = 1$.

Se tiene $M_a = 9.26 \text{ Nm}$ y $M_m = 0 \text{ Nm}$ debido a la carga alternante. Adicionalmente se tiene $T_a = 0 \text{ Nm}$ y $T_m = 5.58 \text{ Nm}$ porque el torque se mantiene constante. Reemplazando en la ecuación (3.21) todos los datos calculados anteriormente, se obtiene $d = 11.9 \text{ mm}$

Se verifica el diseño con el diámetro calculado, por lo que se recalcula k_b con la ecuación 3.24 obteniendo $k_b = 0.951$ y se calcula el nuevo S_e .

$$S_e = 0.93 \times 0.951 \times 0.868 \times 190 \text{ MPa} = 145.91 \text{ MPa}$$

Se obtiene un diámetro definitivo $d = 11.7 \text{ mm}$. Se selecciona un diámetro comercial $d = 12 \text{ mm}$, y se calcula el factor de seguridad que se obtiene, despejando la ecuación (3.21), dando un $s = 2.17$

Para el diseño del eje del rodillo de cola, se considera el mismo esquema del rodillo motriz, indicado en la Figura 27. Para el dimensionamiento del eje se realiza el análisis de fuerza cortante y momento flector, de acuerdo a las cargas a las que será sometido. Se considera el diagrama de cuerpo libre del eje mostrado en la Figura 28, teniendo como datos: $T_1 = 264 \text{ N}$, $T_2 = 117.33 \text{ N}$ y $q_t = 19.78 \text{ N}$.

A partir de los diagramas de fuerza cortante y momento flector de la Figura 30, se calcula el momento total máximo.

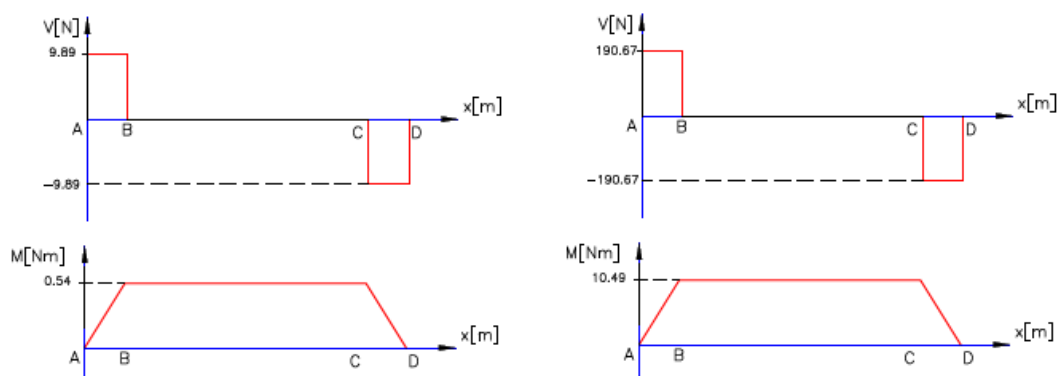


Figura 30 Diagramas de fuerza cortante y momento flector del eje del tambor de cola

$$M_{Byz} = M_{Cyz} = 9.89 \text{ N} \times 0.055 \text{ m} = 0.54 \text{ Nm}$$

$$M_{Bxz} = M_{Cxz} = 190.67 \text{ N} \times 0.055 \text{ m} = 10.49 \text{ Nm}$$

$$M_{\text{máximo}} = \sqrt{M_{Byz}^2 + M_{Bxz}^2} = \sqrt{0.54^2 + 10.49^2} = 10.5 \text{ Nm}$$

El torque en el eje del rodillo de cola es $T = 0 \text{ Nm}$, teniendo $T_a = 0 \text{ Nm}$ y $T_m = 0 \text{ Nm}$. Adicionalmente se tiene $M_a = 10.5 \text{ Nm}$ y $M_m = 0 \text{ Nm}$ debido a que la carga es alternante y $S_e = 138.04 \text{ MPa}$. Reemplazando en la ecuación (3.21) todos los datos calculados anteriormente, se obtiene $d = 11.6 \text{ mm}$

Se verifica el diseño con el diámetro calculado, se recalcula k_b con la ecuación (3.24), obteniendo $k_b = 0.95$

$$S_e = 0.93 \times 0.95 \times 0.868 \times 190 \text{ MPa} = 145.71 \text{ MPa}$$

Se obtiene un diámetro definitivo $d = 11.4 \text{ mm}$. Se define un diámetro comercial $d = 12 \text{ mm}$, y se calcula el factor de seguridad que se obtiene, despejando de la ecuación (3.21), dando un $s = 2.35$

De acuerdo con los cálculos anteriores y considerando costos de manufactura, los rodillos presentan las características que se describen en la Tabla 26.

Tabla 26

Características técnicas de los rodillos motriz y de cola

Característica	Valor
Diámetro del rodillo	76.2 mm (3 pulg)
Diámetro del eje	19.05 mm (3/4 pulg)
Longitud del rodillo	340 mm
Espesor del rodillo	2mm
Peso total	3 kg

Selección de las chumaceras para el rodillo motriz y de cola

Las fuerzas que van a actuar sobre los rodamientos se indican en la Figura 31.

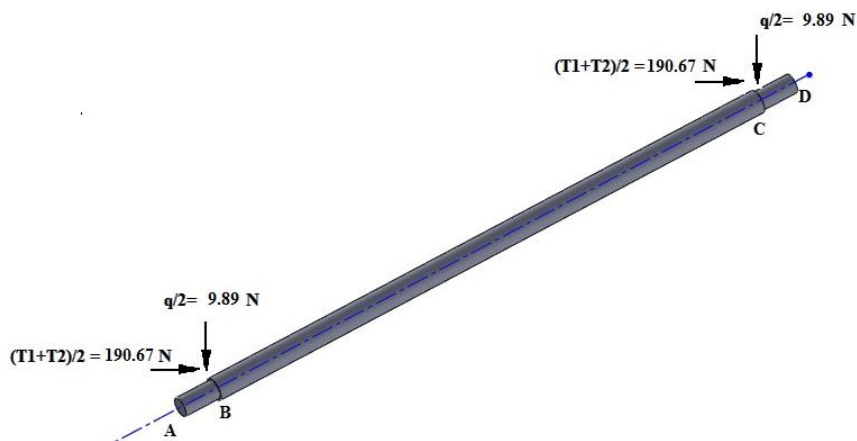


Figura 31 Fuerzas que actúan en los rodamientos del eje del tambor de cola

A partir de esto, se calcula la carga radial en los puntos A y D y se define la fuerza axial con un valor de $F_a = 0 \text{ N}$.

$$R_A = R_D = \sqrt{9.89^2 + 190.67^2} = 190.93 \text{ N}$$

$$R_A = R_D = F_r = 190.93 \text{ N}$$

Para calcular la carga estática equivalente y considerando que $F_a/F_r \leq 0.8$, se tiene la ecuación (3.26).

$$P_0 = F_r \quad (3.26)$$

$$P_0 = 0.19 \text{ kN}$$

Para calcular la carga dinámica equivalente se considera la ecuación (3.27)

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3.27)$$

Dónde X y Y son factor radial y axial respectivamente, con un valor de $e = 0.22$. Se tiene el caso $F_a/F_r \leq e$, por lo que los valores de los factores son $X=1$ $Y=0$.

$$P = 0.19 \text{ kN}$$

Se determina la capacidad dinámica de carga necesaria del rodamiento de acuerdo a la ecuación (3.28)

$$C = a_f \cdot X_D^{1/p} \cdot P \quad (3.28)$$

Dónde:

C = 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

El múltiplo de vida nominal de acuerdo a las condiciones requeridas en la aplicación se calcula de acuerdo a la ecuación (3.29) (Budynas & Nisbett, 2008):

$$X_D = \frac{60L_D n_D}{L_{10}} \quad (3.29)$$

Dónde:

L_D = Vida deseada en horas

n_D = Velocidad deseada en rpm

L_{10} = Vida nominal 10^6 revoluciones

El objetivo de vida del rodamiento es de 50 kh, considerando 8 kh al año que equivale a 6 años de trabajo.

$$x_D = \frac{60(50\ 000)(38\ rpm)}{10^6}$$

$$x_D = 114$$

Para la utilización de rodamientos en rodillos de bandas transportadoras se recomienda un factor de aplicación $a_f = 4$ (FAG Sales Europe GmbH, 2000). Para el caso de rodamientos de bolas se utiliza el valor del exponente $p=3$. Reemplazando el valor calculado en la ecuación (3.28), se obtiene:

$$C = 4 \cdot 114^{1/3} \cdot (0.19\ kN) = 3.68\ kN$$

Del catálogo de chumaceras comerciales CMB, se selecciona una chumacera con un rodamiento de acuerdo al diámetro del eje de los rodillos cuyas características se especifican en la Tabla 26, por lo que se selecciona la chumacera CMB UFC204-12 que presenta las características que se describen en la Tabla 27.

Tabla 27

Características técnicas de la chumacera CMB UCF204-12

Característica	Valor
Capacidad de carga estática	6.65 kN
Capacidad de carga dinámica	12.8 kN
Diámetro del eje	19.05 mm (3/4 pulg)
Tipo de chumacera	De pared, cuadrada
Peso	0.23 kg

Fuente: (CMB-CETA - Teach Industrial, 2009)

Se calcula el tiempo de vida útil con el rodamiento seleccionado utilizando la ecuación (3.30)

$$L = \left(\frac{C_c}{P}\right)^p \quad (3.30)$$

Dónde:

C_c = Capacidad de carga dinámica según el catálogo (kN)

$$L = \left(\frac{12.8}{0.19}\right)^3$$

$$L = 305\,7512 \text{ millones de revoluciones}$$

Se calcula la duración en horas del rodamiento de acuerdo a la ecuación (3.31)

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{60 \cdot n} \quad (3.31)$$

Dónde:

L = Vida nominal (10^6 revoluciones)

n = Velocidad (rpm)

$$L_h = \frac{42 \times 10^6}{60(38)}$$

$$L_h = 134 \times 10^6 \text{ horas}$$

Estructura de la banda

La banda transportadora a ser construida tiene las características que se detallan a continuación:

- Tipo de banda: Banda transportadora horizontal tipo mesa
- Material de la banda: PVC
- Distancia entre centros: 1.2m
- Ancho de la banda 0.3m
- Altura total: 0.75 m
- Ancho de la estructura: 0.48 m

Un esquema de la estructura se indica en la Figura 32.



Figura 32 Esquema de la estructura de la banda transportadora

3.3.4.2 Diseño electrónico de la Banda transportadora

El sistema de la celda de trabajo se enciende mediante un interruptor y para ponerlo en funcionamiento, el controlador central de la celda envía una señal para la activación de un relé el cual permite la alimentación de la fuente de 12V al motor.

Para el control de la velocidad del motor, se utilizará un módulo PWM cuya imagen se observa en la Figura 33 y su esquema de conexión se indica en la Figura 34. El módulo PWM posee las características que se describen en la Tabla 28.



Figura 33 Modulo PWM

Tabla 28

Especificaciones técnicas del módulo PWM

Característica	Valor
Corriente de salida	3 A
Potencia máxima	80 W
Voltaje de entrada	6 a 28V
Ciclo de trabajo ajustable	10% a 100%

Fuente: (ELECTRONILAB, 2016)

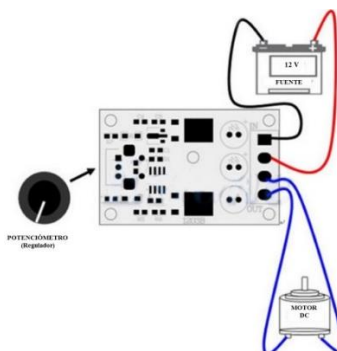


Figura 34 Esquema de conexión del módulo PWM

Fuente: (ELECTRONILAB, 2016)

Adicionalmente en la tarjeta de control de la banda, se realiza el circuito de conexión para los indicadores visuales y para el interruptor que enciende el sistema de la celda de trabajo.

Cálculo del ancho de la pista

Para la elaboración de la placa del circuito, se realiza el cálculo del ancho de pista necesario de acuerdo a las condiciones que tendrá el circuito referente a corriente,

temperatura y altura. A continuación se enlistan las especificaciones necesarias para la placa:

- Corriente máxima 4 A
- Variación máxima de temperatura 10°C
- Altura: 35 micras = 1 onzas/pie²
- Debido a que la pista es externa se tiene $k_1 = 0.0647$, $k_2 = 0.4281$, $k_3 = 0.6732$.

$$Ancho = \frac{\left(\frac{I}{k_1 \times \Delta T^{k_2}}\right)^{\frac{1}{k_3}}}{1.378 \times Altura}$$

$$Ancho = 76 \text{ mils}$$

El diagrama esquemático y la representación 3D de la conexión del circuito de control para la banda se indica en la Figura 35.

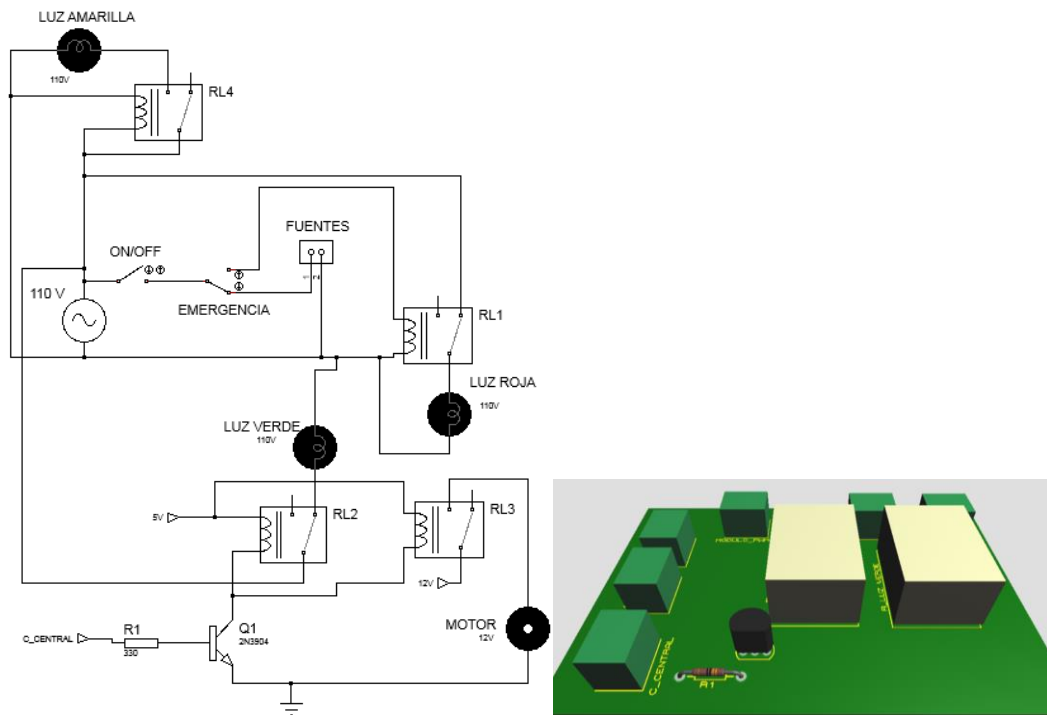


Figura 35 Circuito de control de la banda transportadora y esquema 3D

3.3.4.3 Sistema de control de la Banda transportadora

Para el funcionamiento de la banda transportadora se realiza un control ON/OFF, en el cual, el controlador central envía una señal que permite energizar un relé que encenderá el motor de la banda, si la señal deja de enviarse el motor se apaga.

3.4 Subsistema 2. Tarjeta de control

La tarjeta de control es la encargada de realizar el control de la celda de trabajo, leer la información de los sensores, activar los actuadores y realizar la comunicación entre PC y Robot.

3.4.1 Tipo de microcontrolador

El microcontrolador es el encargado de ejecutar el algoritmo de control, y el encargado de procesar la información de los sensores del robot. La adecuada selección del tipo de controlador permite un diseño óptimo y económico para el funcionamiento del sistema.

3.4.1.1 Alternativas de diseño

AVR (Advanced Virtual RISC)

Es una familia de microcontroladores de 8 bits, fabricados por la empresa noruega ATMEL.

Características:

- Compiladores de lenguaje C, C++, Basic, cuyos IDE se pueden descargar gratuitamente en la web.
- En el microcontrolador se incluye un bloque oscilador formado por un arreglo RC para proveer la señal de reloj.
- Reducido consumo de voltaje y corriente.
- Bajo costo.

- Amplia disponibilidad y difundido mundialmente.
- Puertos de E/S bidireccionales configurables independientemente pin por pin.
- Gran poder de procesamiento.
- Ejecuta la mayoría de sus instrucciones en un solo ciclo de reloj

PIC (*Peripheral Interface Controller*)

Es una familia de microcontroladores de 8 bits, fabricados por la empresa estadounidense MICROCHIP.

Características:

- Compiladores de lenguaje C, C++, Basic, cuyos IDE tienen costo.
- Sencillo de grabar.
- Alta difusión a nivel global, por lo que se tiene alcance de gran cantidad de información.
- Eficiencia de código: gran capacidad de compactación de programas.
- Posibilidad de protección de código.
- Juego reducido de instrucciones y de fácil aprendizaje.
- Necesita múltiples ciclos de reloj por instrucción.

3.4.1.2 Evaluación y selección de alternativas

De acuerdo con los requerimientos del proyecto se concluye que el tipo de microcontrolador más adecuado es el AVR. Debido principalmente a factores como:

- El software de programación se lo puede descargar libremente en internet.
- Se requiere un microcontrolador eficiente.
- Se requiere que sea económico.

Las alternativas propuestas para el microcontrolador se describen en la Tabla 29, en la Tabla 30 presenta la ponderación teniendo en cuenta los criterios importantes para la selección. A continuación se evalúa cada solución teniendo en cuenta los

criterios propuestos (Ver Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33) y finalmente, de acuerdo a las ponderaciones alcanzadas se selecciona una de las alternativas planteadas.

Tabla 29

Alternativas del microcontrolador para el sistema

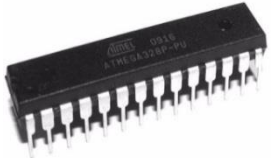


Solución	Imagen	Características
A ATMEGA 328P		-Costo: \$ 3.31 -Memoria Flash: 32 KB -SRAM: 2KB -Frecuencia máxima: 20 MHz -Canales PWM: 6
B ATMEGA 168		-Costo: \$5.42 -Memoria Flash: 16 KB -SRAM: 1KB -Frecuencia máxima: 16 MHz -Canales PWM: 6
C ATMEGA 8		-Costo: \$ 4.32 -Memoria Flash: 8 KB -SRAM: 1 KB -Frecuencia máxima: 16 MHz -Canales PWM: 3

Tabla 30

Ponderación de criterios de evaluación del microcontrolador

Criterio	Costo	Memoria	PWM	$\sum+1$	Pond.
Costo	-	5	0	6	0.33
Memoria	0	-	2.5	3.5	0.19
PWM	5	2.5	-	8.5	0.48
Total:				18	1.00

Tabla 31

Ponderación de costos para las alternativas del microcontrolador

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	5	11	0.61
Solución B	0	-	0	1	0.06
Solución C	0	5	-	6	0.33
Total:				18	1.00

Tabla 32

Ponderación de la carga para las alternativas del microcontrolador

Memoria	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	5	11	0.61
Solución B	0	-	5	6	0.33
Solución C	0	0	-	1	0.06
Total:				18	1.00

Tabla 33

Ponderación de implementación para las alternativas del microcontrolador

PWM	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	2.5	5	8.5	0.47
Solución B	2.5	-	5	8.5	0.47
Solución C	0	0	-	1	0.06
Total:				18	1.00

Tabla 34**Conclusión en la selección de diseño para el microcontrolador**

	Costo	Memoria	PWM	\sum	Prioridad
Solución A	0.201	0.116	0.226	0.534	1
Solución B	0.020	0.063	0.226	0.309	2
Solución C	0.109	0.011	0.029	0.149	3
Total:				1.00	

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 34, se selecciona la solución con la prioridad 1, por ser la que cumple de mejor manera los criterios planteados. Por tanto se selecciona el microcontrolador ATMEGA 328P, el cual presenta las características que se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35

Especificaciones técnicas del microcontrolador ATMEGA 328P

Característica	Valor
PWM	6 canales
Voltaje de operación	1.8 a 5.5 V
Temperatura de trabajo:	-40°C a 105 °C
ADC	10 bits
Canales ADC	6
Timers	3
Flash	32 KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB

Fuente: (Atmel, 2016)

3.4.2 Medio de transmisión de datos

El medio de transmisión de datos permitirá la comunicación entre la celda de trabajo y la computadora.

3.4.2.1 Alternativas de diseño

Comunicación Serial

Un puerto serial es conocido también como RS-232. El término serial se refiere a los datos enviados mediante un solo cable, es decir los bits se envían uno detrás de otro.

Características:

- La comunicación serial puede ser síncrona o asíncrona.
- Fácil administración y configuración.
- Se utiliza para transmitir datos en formato ASCII.
- Baja costo.
- Permite trabajar en grandes distancias entre el emisor y el receptor (máx. 1200m).

Comunicación por Bluetooth

Es un protocolo de comunicación, de basa en una emisión de radiofrecuencia de baja potencia.

Características:

- Elimina todo tipo de cables para las conexiones entre equipos.
- Fácil instalación.
- Lenta velocidad de transmisión.
- Reducido alcance (máx. 30m).
- Conexión universal para distintos dispositivos.

- Soporta diversos tipos de datos para el envío.
- Buffer limitado para transferencia de datos.
- Dificultad para emparejar más de dos dispositivos.

3.4.2.2 Evaluación y selección de alternativas

De acuerdo con los requerimientos del proyecto para la comunicación de datos entre PC y tarjeta de control, se necesita principalmente factores como:

- Debe ser económica.
- La comunicación debe ser rápida.
- Se debe transmitir cadenas de caracteres.
- La distancia de transmisión es corta.
- Debe permitir una conexión segura y confiable.

Las alternativas propuestas para el microcontrolador se describen en la Tabla 36. La Tabla 37 presenta la ponderación teniendo en cuenta los criterios importantes para la selección.

Tabla 36

Alternativas de medio de comunicación entre PC y tarjeta de control



Solución	Imagen	Características
A D-SUN USB a TTL		-Costo: \$ 5 -Tamaño de datos: 1 bit de inicio+ 5 a 8 bits de datos + 1 bit de parada -Velocidad: 112 Kbps
B HC-05		-Costo: \$7.5 -Tamaño de datos: 8 bits de datos+ 1 bit parada -Velocidad: 2 a 3 Mbps

Tabla 37

Ponderación de criterios de medio de comunicación entre PC y tarjeta de control

Criterio	Costo	Velocidad	Seguridad	Implementación	$\sum+1$	Pond.
Costo	-	0	0	5	6	0.17
Velocidad	5	-	2.5	5	13.5	0.40
Seguridad	5	2.5	-	5	13.5	0.40
Implementación	0	0	0	-	1	0.03
Total:					34	1.00

A continuación se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40 y Tabla 41) y finalmente, de acuerdo a las ponderaciones alcanzadas se selecciona una de las alternativas planteadas.

Tabla 38

Ponderación de costos para alternativas de medio de comunicación

Costo	Solución A	Solución B	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	6	0.86
Solución B	0	-	1	0.14
Total:			7	1.00

Tabla 39

Ponderación de la velocidad para las alternativas de medio de comunicación

Velocidad	Solución A	Solución B	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	0	1	0.14
Solución B	5	-	6	0.86
Total:			7	1.00

Tabla 40

Ponderación de seguridad para las alternativas de medio de comunicación

Seguridad	Solución A	Solución B	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	6	0.86
Solución B	0	-	1	0.14
Total:			7	1.00

Tabla 41

Ponderación de implementación para las alternativas de medio de comunicación

Implementación	Solución A	Solución B	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	2.5	3.5	0.50
Solución B	2.5	-	3.5	0.50
Total:			7	1.00

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 42, se selecciona la solución con la prioridad 1, por ser la que cumple de mejor manera los criterios planteados. Por tanto se selecciona el módulo para comunicación serial D-SUN USB a TTL el cual presenta las características que se describen en la Tabla 43.

Tabla 42

Conclusión en la selección para el medio de comunicación entre PC -Tarjeta de control

	Costo	Velocidad	Seguridad	Implementación	Σ	Prioridad
Solución A	0.146	0.056	0.344	0.015	0.551	1
Solución B	0.026	0.344	0.056	0.015	0.441	2
Total:					1.00	

Tabla 43

Especificaciones técnicas del módulo D-SUN USB a TTL

Característica	Valor
Chip	PL2303HX
Protección fusible	500 mA
USB	2.0
Velocidad en baudios	300 a 1.5 Mbps
Voltaje de trabajo	4.25 a 5.25 V

Fuente: (DX Deal Extreme, 2013)

3.4.3 Diseño Final de la Tarjeta de control

3.4.3.1 Diseño electrónico de la Tarjeta de control

La parte electrónica de la tarjeta de control se ha diseñado de manera que permita una conexión fácil a los demás subsistemas de la celda de trabajo.

Como microcontrolador se utiliza el AVR 328P, se implementa un circuito oscilador con un cristal de 16Hz. Adicionalmente para la comunicación entre la PC y la tarjeta de control, se utiliza el módulo D-SUN USB a TTL. Los pines de transmisión y recepción del dispositivo (RX_d y TX_d) y del microcontrolador (RX_m y TX_m) se conectan cruzados, es decir RX_m-TX_d y TX_m-RX_d , como se indica en la Figura 36.

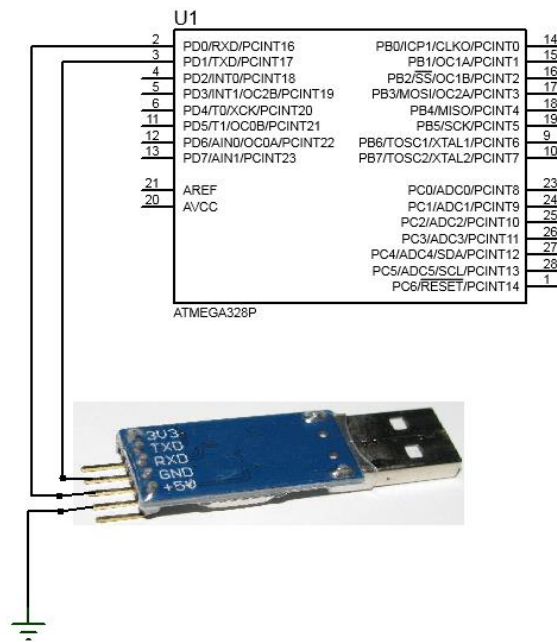


Figura 36 Conexión del módulo D-SUN al microcontrolador

Adicionalmente, se utilizarán las entradas analógicas del microcontrolador para lectura de los sensores del robot. Por lo que para energizar el convertidor ADC y eliminar ruidos, se utiliza un filtro pasa-bajos conectado al pin 20, el cual se encuentra propuesto en la hoja técnica del microcontrolador (Atmel, 2016) y se indica en la Figura 37.

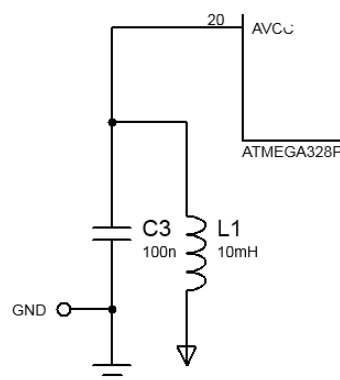


Figura 37 Circuito pasa-bajos para convertidor ADC

Para protección en los pines de salidas digitales que activan los relés del sistema, se utilizan diodos.

Cálculo del ancho de la pista

Para la elaboración de la placa del circuito, se realiza el cálculo del ancho de pista necesario de acuerdo a las condiciones que tendrá el circuito referente a corriente, temperatura y altura.

- Corriente máxima 1.5 A
- Variación máxima de temperatura 10°C
- Altura: 35 micras = 1 onzas/pie²
- Debido a que la pista es externa se tiene $k_1 = 0.0647$, $k_2 = 0.4281$, $k_3 = 0.6732$.

$$Ancho = \frac{\left(\frac{I}{k_1 \times \Delta T^{k_2}}\right)^{\frac{1}{k_3}}}{1.378 \times Altura}$$

$$Ancho = 20 \text{ mils}$$

La tarjeta de control es el centro de mando de todo el sistema de la celda de trabajo, activa la banda transportadora y el robot. Se energiza una vez que el sistema haya sido encendido mediante el interruptor y activa los subsistemas de acuerdo a las órdenes enviadas desde la HMI de control. El circuito de la conexión de la tarjeta de control se indica en la Figura 38 y el esquema 3D se indica en la Figura 39.

3.4.3.2 Sistema de control de la tarjeta

La tarjeta de control es la encargada del funcionamiento de todos los elementos del sistema. Para la banda transportadora y electroimán el control es ON/OFF. En el caso del robot se realiza un control PID para cada uno de los motores con la finalidad de hacer un control de la posición de cada uno de los eslabones.

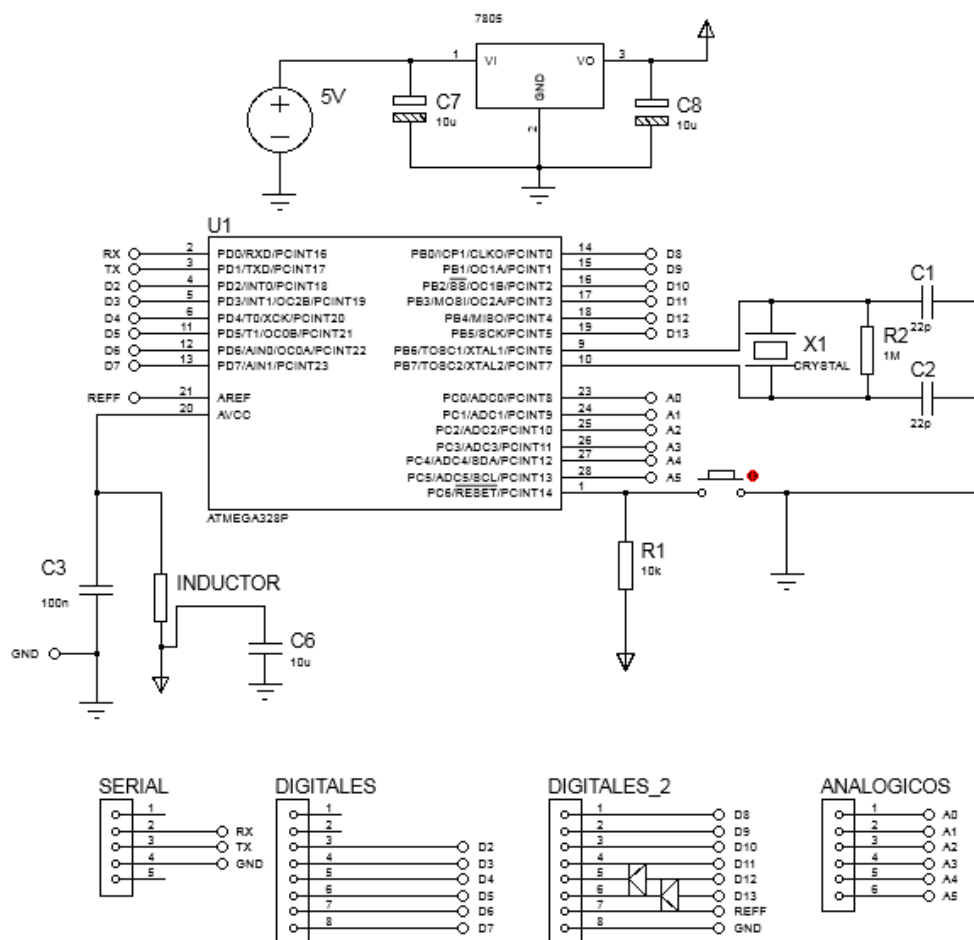


Figura 38 Circuito de la tarjeta de control

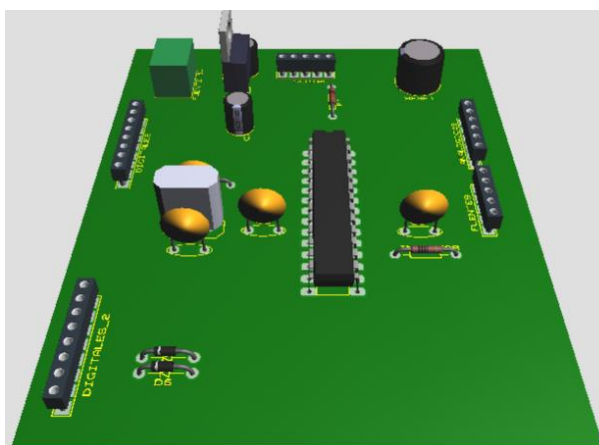


Figura 39 Esquema 3D de la tarjeta de control

Para realizar el control PID de los motores es necesario hallar la función de transferencia de cada uno de ellos, de manera que se puedan hallar las constantes K_p , K_i y K_d .

Las funciones de transferencia de cada uno de los motores (Ver Figura 40), al igual que las constantes del controlador se calcularon mediante la utilización de un software en el que se colocaron como entrada: datos del voltaje suministrado al motor y como salida: datos de la posición angular del eslabón. En la Tabla 44 se enlistan las funciones de transferencia y las constantes obtenidas para cada uno de los motores.

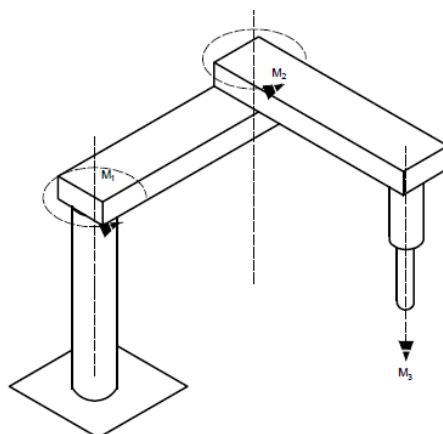


Figura 40 Esquema de ubicación de los motores en el robot

Tabla 44

Funciones de transferencia y constantes del controlador de los motores

No.	Función de Transferencia	Constantes del controlador
M_1	$\frac{46.8}{s^3 + 2.65s^2 + 46.5s + 2.58 \times 10^{-8}}$	$K_p = 15$ $K_d = 7.5$ $K_i = 0.005$
M_2	$\frac{2.21 \times 10^{-8}}{s^3 + 0.02s^2 + 1.59 \times 10^{-5}s + 4.75 \times 10^{-8}}$	$K_p = 16$ $K_d = 5.5$ $K_i = 0.07$
M_3	$\frac{-0.8939}{s^3 + 3.37s^2 + 5.33s + 0.3039}$	$K_p = 80$ $K_d = 5$ $K_i = 10$

3.5 Subsistema 3. Sistema de visión artificial

3.5.1 Diseño Final del sistema de visión artificial

3.5.1.1 Algoritmo de control del sistema de visión artificial

El sistema de visión artificial se realiza para el reconocimiento de colores y formas. La programación se la realiza en lenguaje Python, utilizando la librería OpenCV.

El sistema debe ser capaz de diferenciar los objetos que son transportados en la banda, de manera que el robot pueda clasificarlos de acuerdo al criterio seleccionado (forma o color).

Los colores que son reconocidos por el sistema son:

- Verde, azul, amarillo

Las formas que son reconocidas por el sistema son:

- Triángulo, cuadrado, pentágono

El algoritmo inicia con la declaración de variables “form” y “col”, las cuales se utilizarán para identificar el tipo de clasificación deseada. Desde la HMI de control, el usuario debe seleccionar si desea clasificar los objetos por forma o color. Posteriormente si se presiona el botón “Visión” se activa la cámara web de manera que empiece la detección de objetos.

Si el tipo de clasificación es por forma se crea una máscara en escala de grises y se busca todos los contornos que sean detectados, se calcula el área de los contornos y si el área es mayor que 0, se determina el centroide de la misma en las coordenadas XY.

Se define el número de vértices de cada uno de los bordes detectados, si el borde tiene 3 vértices se considera un triángulo, si tiene 4 vértices se considera un cuadrado y si tiene 5 vértices se considera un pentágono. En cualquiera de los tres casos mencionados, se dibuja el contorno de la forma identificada y se muestra las coordenadas de su centroide.

Cuando se detecta más de 5 vértices, no realiza ninguna acción sobre la imagen capturada por la cámara y continúa reconociendo los contornos hasta que se cumpla una de las condiciones.

Si el tipo de clasificación es por color se definen los rangos mínimo y máximo en el espacio HSV de los colores deseados (verde, azul y amarillo) y se crea una máscara diferente para cada uno. Se debe destacar que la detección por color encierra dentro de un círculo todos los puntos que abarca el rango establecido en las máscaras de cada color. Por tanto se busca todos los objetos que sean detectados y que cumplan con alguna de las máscaras creadas y si el radio del círculo detectado es mayor a 35 se determina el centroide de la misma en las coordenadas X Y.

Cuando los objetos colocados en el área de visión de la cámara son de colores diferentes a los definidos, no se realiza ninguna acción sobre la imagen capturada y continúa reconociendo la imagen hasta que un objeto cumpla alguna de las condiciones.

En la Figura 41, se observa el diagrama de flujo del algoritmo de control del sistema de visión artificial.

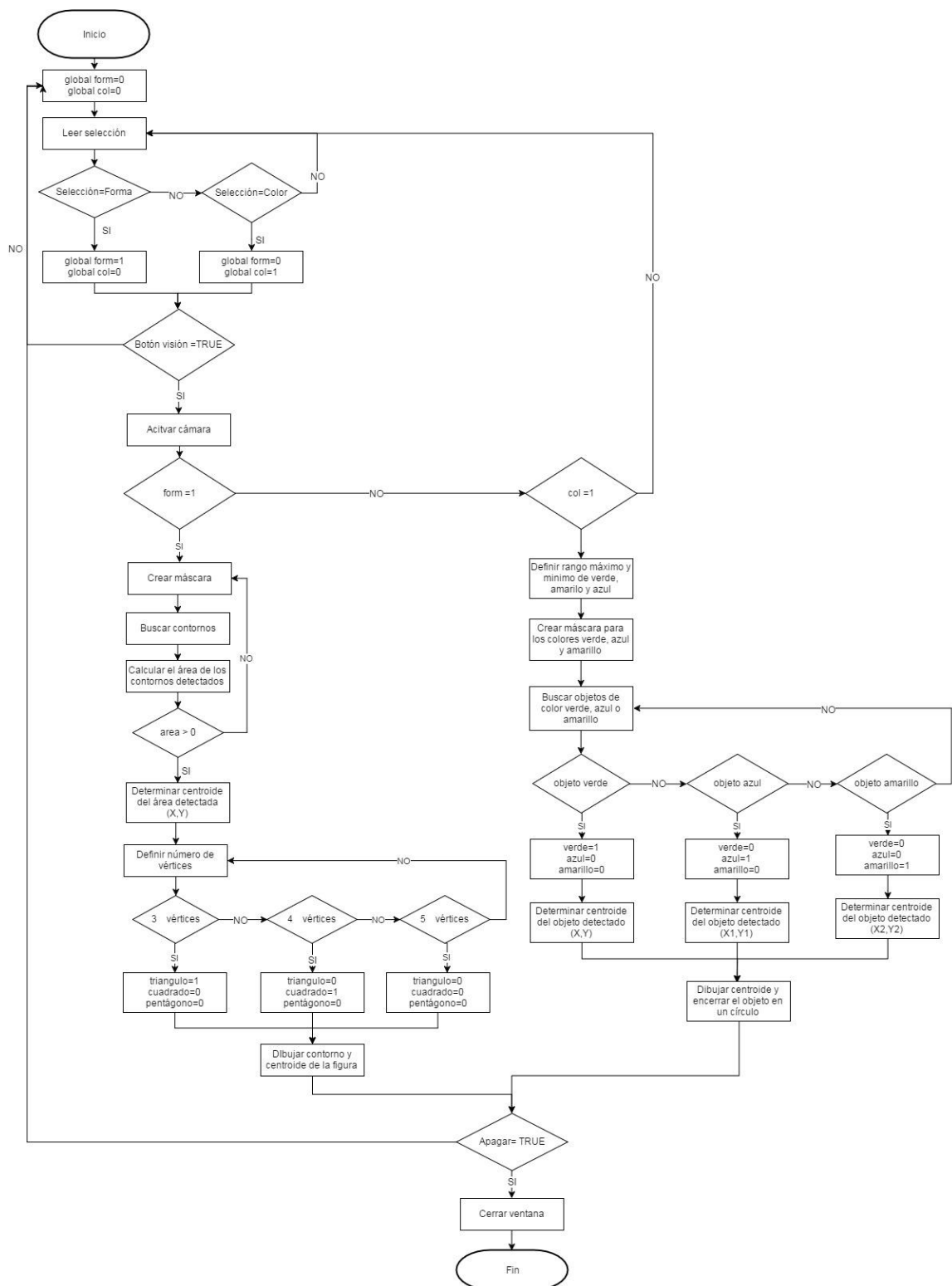


Figura 41 Algoritmo del sistema de control de visión artificial

3.6 Subsistema 4. Filtro de Kalman

3.6.1 Cinemática del Robot SCARA

Para el posicionamiento del efector final, es necesario realizar un análisis de la cinemática del robot, para lo que se utiliza el método de Denavit Hartenberg. Se parte de la Figura 42 para hallar los valores de la Tabla 45, lo cual permitirá obtener las ecuaciones para el posicionamiento en los ejes x, y, z, en función de las coordenadas articulares del robot.

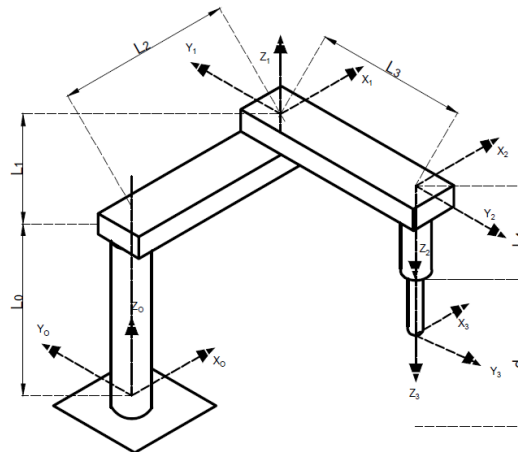


Figura 42 Esquema de robot SCARA para definir parámetros del método de Denavit Hartenberg

Tabla 45

Parámetros de Denavit Hartenberg

No. Art.	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

Se calculan las matrices de transformación A, para posteriormente obtener la matriz final T a partir de los parámetros obtenidos:

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

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

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

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

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3$$

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

A partir de la matriz anterior se obtiene los valores de las coordenadas x, y, z en función de las coordenadas articulares.

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

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

$$z = (L_1 + L_0) - (L_4 + d)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se despeja de manera que se obtengan las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas.

$$q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + x^2 + y^2 - L_3^2}{2L_2\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

$$q_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \right)$$

$$d = (L_1 + L_0) - (L_4 + z)$$

Se reemplazan los valores de L_0 , L_1 , L_2 , L_3 y L_4 en las ecuaciones anteriores y se obtiene:

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

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

$$L_3 = 200 \text{ mm}$$

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

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

$$q_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - 320000}{80000} \right)$$

$$d = 169.75 - z$$

3.6.2 Modelamiento dinámico

El filtro de Kalman permitirá realizar la predicción de la posición de los objetos que deben ser clasificados por el robot. Para lo cual se considera que la banda transportadora mantiene una velocidad constante, entonces el modelamiento del objeto en el espacio de estados se describe a continuación.

Se tiene como estados la posición del objeto en x y la velocidad del objeto la cual es constante.

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

$$Z = Hx + R$$

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

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

$$H = [1 \ 0]$$

Donde A es la matriz de transición considerando un tiempo de muestreo de 0.11seg. B es la matriz de control teniendo un valor nulo debido a que se trata de un movimiento a velocidad constante y H es la matriz de observación que nos permite obtener la posición del objeto.

Adicionalmente se define la velocidad de la banda como $v = 54.55 \text{ mm/s}$, y la posición inicial $x_{inicial}$ está dada por la cámara web. Por tanto el vector de estado inicial del objeto es

$$x_o = \begin{bmatrix} x_{inicial} \\ 54.55 \end{bmatrix}$$

3.6.3 Diseño Final del Filtro de Kalman

3.6.3.1 Cálculo de matrices y parámetros del Filtro de Kalman

Se parte calculando la matriz de covarianza inicial, la cual presenta la forma que se indica a continuación

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}$$

En el presente caso la velocidad de la banda es constante, por lo que $\sigma_y^2 = 0$. Para un mejor desempeño del filtro, se utiliza el valor de $\sigma_y^2 = \sigma_x^2$. Definiendo la matriz P como sigue

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_x^2 \end{bmatrix}$$

Para obtener el valor de σ_x^2 se parte de mediciones previamente obtenidas por la cámara web. Se tomaron 100 datos para el cálculo de la media y la desviación estándar de los mismos, obteniendo como resultado lo que se muestra a continuación.

$$\bar{x} = 129.55$$

$$\sigma_x^2 = 0.002075$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.002075 & 0 \\ 0 & 0.002075 \end{bmatrix}$$

Las matrices Q y R, se consideran el ruido en los procesos de medida (matriz de covarianza de transición) y estimación respectivamente (matriz de covarianza de observación). Los valores de las matrices fueron ajustados experimentalmente con el fin de obtener el mejor resultado.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 1 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 4 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 4 \times 10^{-6} \end{bmatrix}$$

3.6.3.2 Algoritmo de control

El algoritmo de Filtro de Kalman se realiza para la predicción de la posición del objeto. La programación se la realiza en lenguaje Python, utilizando la librería threading, numpy, pykalman y matplotlib para ejecutar el algoritmo.

El sistema debe ser capaz de tomar datos de la posición del objeto en tiempo real y aplicar filtro de Kalman para realizar la predicción y corrección, mientras el objeto se encuentre dentro del campo de observación de la cámara. Posteriormente debe predecir la posición del objeto hasta que haya entrado dentro del rango de trabajo del robot para que pueda ser clasificado de acuerdo a sus características.

El algoritmo inicia importando las librerías `pykalman`, `matplotlib`, `numpy` y `threading`. Se crean 4 funciones que se ejecutan en paralelo, sin embargo entre ellas se comparten variables que condicionan su funcionamiento. Como primera función se tiene el algoritmo de visión artificial, el cual al reconocer un objeto activa la segunda función. Adicionalmente, de la primera función se toma los valores del centroide de los objetos detectados.

La segunda función contiene el algoritmo del filtro de Kalman mientras el objeto se encuentra dentro del rango de visión de la cámara y se puede hacer actualización de datos. Se crea una matriz en la que se almacena los datos del centroide de la pieza detectada medidos por la cámara, se crea el objeto para utilizar la función `KalmanFilter` de la librería `pykalman`, para ello se definen la matriz de transición, observación, matriz de covarianza inicial, matriz estados iniciales y las matrices de ruido Q y R . Posteriormente se llama a la función `filter` enviando como datos la matriz de mediciones, para la etapa de corrección del filtro. Mientras se obtiene cada valor del filtro y de las mediciones, utilizando la librería `matplotlib` se grafica cada uno de los valores de modo que se pueda visualizar la acción del filtro con respecto a las mediciones. Cuando el objeto ya no es detectado por la cámara se considera el fin de la predicción, se toma el último dato obtenido del filtro y se activa la tercera función con el fin de comenzar la etapa de predicción en el área donde el objeto está fuera del área de visión.

La tercera función consiste en utilizar únicamente la etapa de predicción del filtro de Kalman, para lo cual se multiplican las matrices del espacio de estados y se define como estado inicial el último dato obtenido en la segunda función. Cuando el objeto se encuentre dentro del área de trabajo del robot, se predice la posición en función del tiempo de posicionamiento del robot y se activa la cuarta función.

La cuarta función se encarga del posicionamiento del robot, se asigna a las variables px y py las coordenadas donde el robot debe tomar el objeto. A partir de las coordenadas rectangulares, se calcula las coordenadas angulares de cada uno de los eslabones, se envía las coordenadas calculadas a la tarjeta de control de manera que

se encargue del posicionamiento del robot. Cuando el robot se haya posicionado activa el electroimán para tomar el objeto. Posteriormente se asignan nuevas coordenadas en función del tipo de objeto y su lugar de clasificación, se envían los datos a la tarjeta de control de manera que se mueva el robot a la posición indicada y se desactiva el electroimán para que el robot deje el objeto. En la Figura 43 se indica el flujograma del algoritmo del Filtro de Kalman.

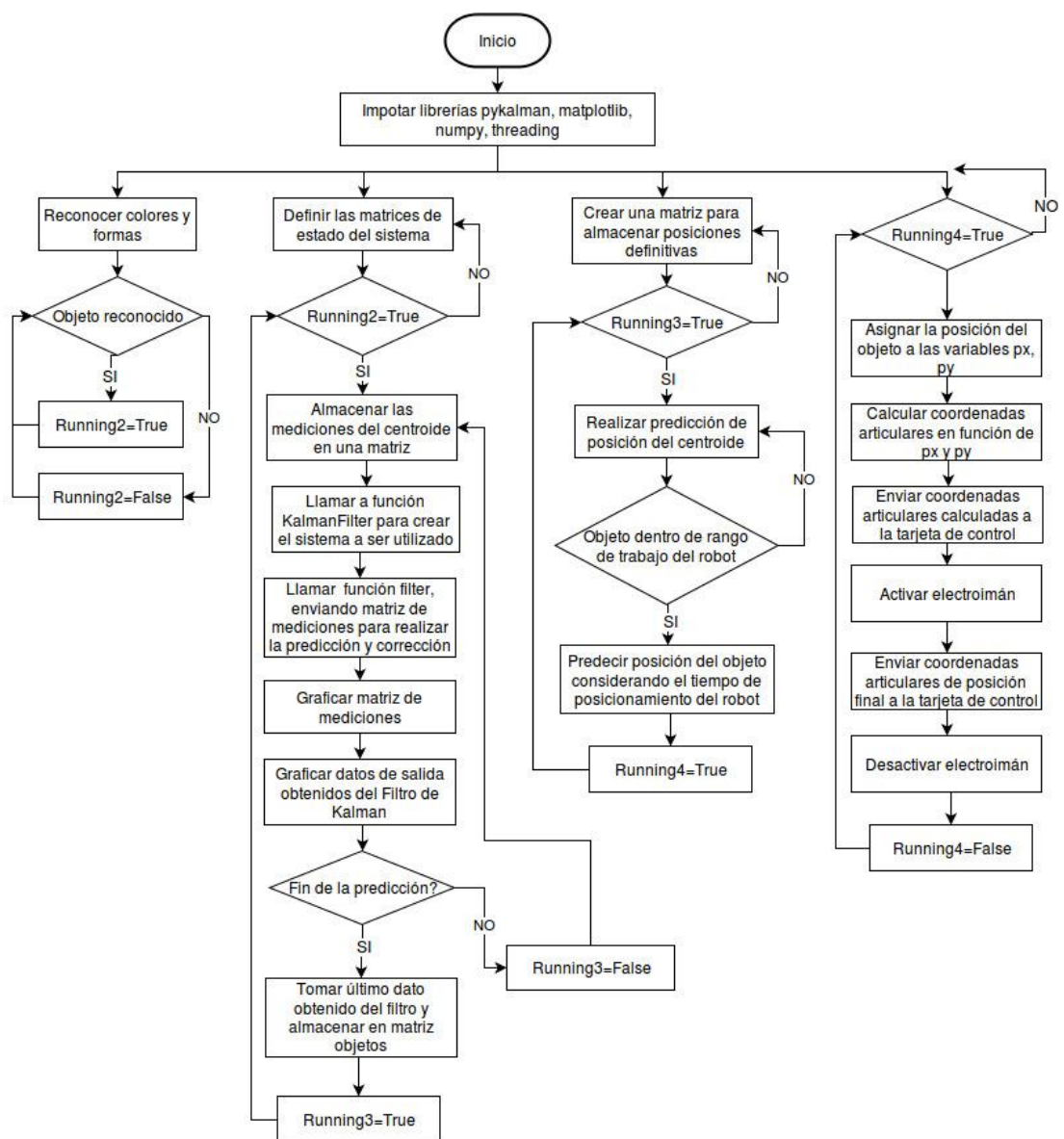


Figura 43 Algoritmo del Filtro de Kalman

3.7 Subsistema 5. Interfaz Humano-Máquina

En el subsistema de Interfaz Humano-Máquina, se analizan alternativas en lo que se refiere al software que se utilizará para la creación de la Interfaz. Para lo cual se analiza las características de cada software disponible y se selecciona la mejor opción de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

3.7.1 Software de para creación de HMI

El diseño de Interfaz Humano-Máquina (HMI) consiste en diseñar interfaces de usuario en la que se utilizan recomendaciones de diseño basadas en directrices genéricas que van de acuerdo a cierta normas. Para el desarrollo de la HMI de la celda de trabajo se utilizará la norma GEDIS.

3.7.1.1 Alternativas de diseño

3.7.1.2 Evaluación y selección de alternativas




La HMI debe permitir al usuario encender/detener la banda transportadora de la celda de trabajo, seleccionar el tipo de objetos a clasificar y visualizar el reconocimiento de objetos. Adicionalmente el programa debe ser compatible con lenguaje Python, el cual se utilizará para el desarrollo de los algoritmos de visión artificial y filtro de Kalman. Por tanto se plantean las alternativas de software para la creación de la HMI tal como se describe en la Tabla 46.

Se realiza la ponderación de criterios para optimizar la selección. La Tabla 47, presenta dicha ponderación teniendo en cuenta los criterios importantes para la selección. Para lo que se considera factores como:

- El software debe ser compatible con lenguaje Python.
- Debe ser económico
- Deber ser sencillo de utilizar e implementar.

Tabla 46

Alternativas de software de diseño para la creación de HMI

Solución	Logo	Características
A Qt Designer		-Código abierto y amplia difusión -Herramientas de desarrollo visual -Gratuito -Multiplataforma -Facilidad de uso -Compatible con Python.
B Scada BR		-Código abierto -Licencia gratuita -Multiplataforma -Utilizada en aplicaciones de automatización industrial -Programación Java
C TANGO Control System		-Código abierto -Licencia gratuita -Programación orientada a objetos

A continuación se evalúa cada solución teniendo en cuenta los criterios propuestos (Ver Tabla 48, Tabla 49 y Tabla 50) y finalmente, de acuerdo a las ponderaciones alcanzadas se selecciona una de las alternativas planteadas.

Tabla 47

Ponderación de criterios de evaluación para el software de la HMI

Criterio	Costo	Compatible con Python	Implementación	$\sum+1$	Pond.
Costo	-	0	2.5	3.5	0.19
Compatible con Python	5	-	2.5	8.5	0.48
Implementación	2.5	2.5	-	6	0.33
Total:				18	1.00

Tabla 48

Ponderación de costos para las alternativas del software para la HMI

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	2.5	2.5	6	0.333
Solución B	2.5	-	2.5	6	0.333
Solución C	2.5	2.5	-	6	0.333
Total:				18	1.00

Tabla 49

Ponderación de compatibilidad con Python para alternativas de software para la HMI

Compatible con Python	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	5	5	11	0.611
Solución B	0	-	2.5	3.5	0.194
Solución C	0	2.5	-	3.5	0.194
Total:				18	1.00

Tabla 50

Ponderación de implementación para las alternativas del software para la HMI

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum+1$	Pond.
Solución A	-	2.5	5	8.5	0.47
Solución B	2.5	-	5	8.5	0.47
Solución C	0	0	-	1	0.06
Total:				18	1.00

Tabla 51

Conclusión en la selección de diseño para el software de la HMI

	Costo	Compatible con Python	Implementación	\sum	Prioridad
Solución A	0.063	0.293	0.155	0.511	1
Solución B	0.063	0.093	0.155	0.311	2
Solución C	0.063	0.093	0.020	0.176	3
Total:				1.00	

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 51, se selecciona la solución con la prioridad 1, por ser la que cumple de mejor manera los criterios planteados. Por tanto se selecciona Qt Designer como software para el desarrollo de la HMI.

3.7.2 Diseño Final

La HMI cuenta con dos ventanas: la ventana principal aparece al iniciar la aplicación y se cuenta con una ventana auxiliar que permite visualizar el trabajo del filtro de Kalman mientras el objeto es detectado por el sistema de visión artificial.

3.7.2.1 Distribución de la HMI

De acuerdo con la norma GEDIS, para iniciar el diseño de la HMI es necesario definir la distribución de los elementos, es decir el lugar donde se ubicará cada uno para una mejor interacción con el usuario. Por tanto en la Figura 44 se define la distribución de la ventana principal de la HMI.

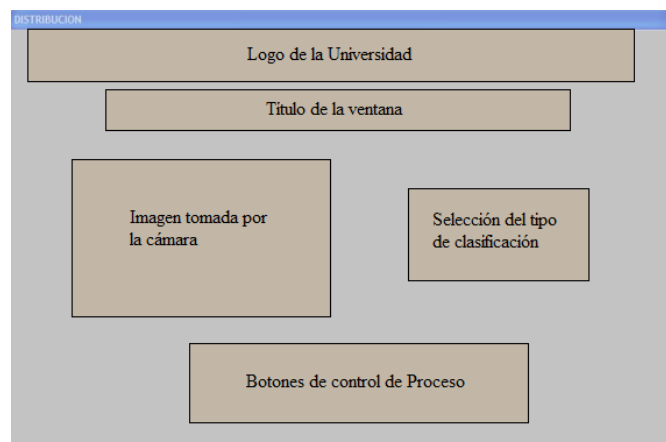



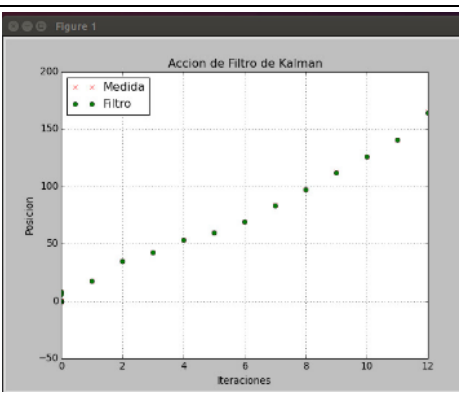
Figura 44 Esquema de la distribución de la HMI

3.7.2.2 Arquitectura y funcionamiento

En la Tabla 52 se indica la arquitectura de la HMI, detallando el funcionamiento de cada ventana.

Tabla 52

Detalle de la Arquitectura y Funcionamiento de la HMI

Arquitectura	Ventana	Funcionamiento
<p>Nivel Área: Pantalla de Proceso</p>		<p>Es la ventana principal del sistema, permite:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Selección del tipo de clasificación -Encendido del sistema de visión -Encendido y apagado de la banda transportadora
<p>Nivel Subárea: Ventana de Tendencia</p>		<p>La ventana aparece cuando haya sido detectado un objeto e indica la acción de filtro de Kalman, comparando los valores medidos con los obtenidos por el filtro.</p>

3.9 Concepto Final

Como concepto final (Ver Figura 45) se propone la banda transportadora acoplada a la estructura de la mesa del robot. En la estructura se encuentra la caja de control, la cual cuenta con un pulsador de emergencia. Adicionalmente se cuenta con otro pulsador de emergencia para la estación de trabajo donde se encuentre el usuario. También se dispone de un ambiente con iluminación controlada para el sistema de visión artificial que se encuentra al inicio de la banda transportadora.

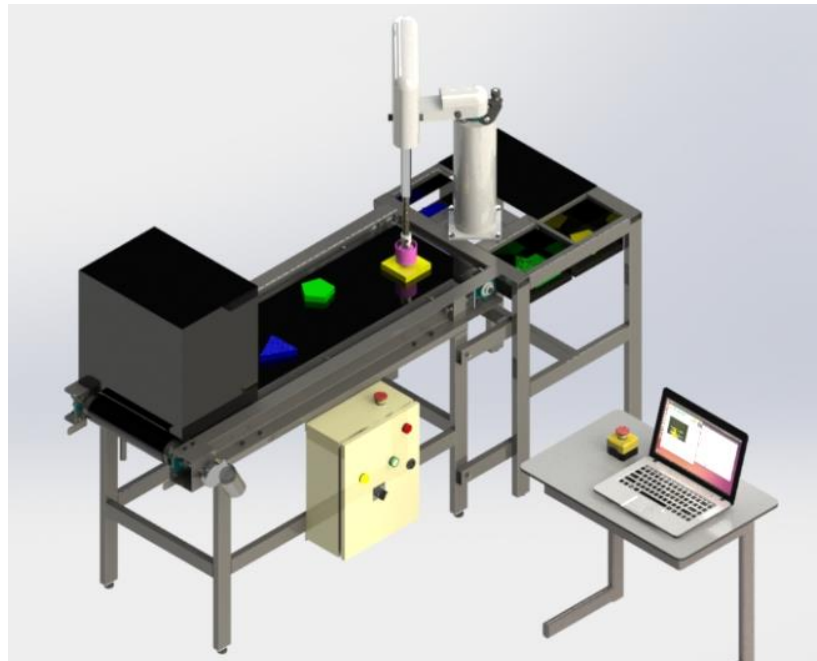


Figura 45 Concepto final de la celda de trabajo

3.10 Resumen

Una vez reconocidas las necesidades del usuario se procede a definir los parámetros técnicos que permitirán satisfacer de la mejor manera las especificaciones del usuario. Algunos de los parámetros necesarios para el diseño de la celda de trabajo son: Contar con un sistema de visión artificial para el reconocimiento de objetos, adecuada selección del tipo de estructura y material de la banda, velocidad de la banda, entre otros.

Para cumplir con los requerimientos técnicos es necesario crear subsistemas que abarquen una función específica del sistema completo, de manera que la combinación sinérgica de cada uno de ellos permita el adecuado funcionamiento del sistema. Para el proyecto se desarrollaron los subsistemas: 1) Banda Transportadora, 2) Tarjeta de control, 3) Sistema de visión artificial, 4) Filtro de Kalman, 5) Interfaz Humano-Máquina.

Se establecen posibles soluciones para cada uno de los subsistemas propuestos, y de acuerdo al método de matrices de priorización se establecen los criterios de mayor

importancia para el funcionamiento del subsistema y se selecciona aquella solución que permita satisfacer de mejor manera el requerimiento.

Posteriormente se procede a realizar el diseño de la banda transportadora, de acuerdo a criterios considerados en la norma CEMA y recomendaciones de fabricantes locales. Para ello se calculan las fuerzas que van a actuar en la misma, de manera que permita el dimensionamiento del motor, diseño de rodillos, selección de chumaceras y diseño geométrico general de la banda.

Para el diseño de la tarjeta de control se consideró el costo y la disponibilidad de salidas PWM necesarias para el control de los actuadores del robot. Se seleccionó el tipo de comunicación entre la computadora y la celda de trabajo de manera que se cuente con una comunicación segura y eficiente. Adicionalmente, para el software de control se obtuvieron las funciones de transferencia de cada uno de los actuadores del robot, con la finalidad de determinar un controlador PID que permita el funcionamiento adecuado de cada uno de ellos.

En el subsistema de visión artificial, se realiza el algoritmo de control para su funcionamiento, el mismo que permita el reconocimiento de objetos de acuerdo a color o forma. Los colores y formas a clasificar son: verde, amarillo y azul, triángulo, cuadrado y pentágono respectivamente.

Para el subsistema de Filtro de Kalman, se inicia con el cálculo de la cinemática inversa del robot, el cual permite obtener las ecuaciones de las coordenadas articulares en función de la posición del robot. Adicionalmente se realiza el modelamiento del objeto para definir sus matrices de espacio de estados. Posteriormente se definen los parámetros que intervienen el cálculo del filtro de Kalman y por último se realiza el algoritmo de control que permitirá el funcionamiento del subsistema.

Para el diseño de la HMI se considera la norma GEDIS, se establece la arquitectura y distribución de la misma y se describe el funcionamiento de cada una de las ventanas.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

El capítulo detalla el proceso de reparación del robot SCARA, la construcción de los elementos diseñados anteriormente y las pruebas de la implementación de los mismos a la celda de trabajo en conjunto con el robot. Adicionalmente, se realiza el análisis de ventajas de implementación del proyecto.

4.1 Reparación del robot SCARA

4.1.1 Situación inicial del Robot SCARA

El robot SCARA inicialmente no se encontraba en funcionamiento. A continuación en la Tabla 53, se detalla el estado del robot al iniciar el desarrollo del proyecto y las actividades que fueron realizadas:

Tabla 53

Descripción de actividades de reparación del robot SCARA

Situación Inicial	Reparación
Desalineamiento de eslabones	-Cambio y ajuste de elementos de sujeción -Incorporación de bocines a los ejes
Sensores y actuadores sin cableado	-Pruebas de funcionamiento de sensores y actuadores
Conector en mal estado	-Cambio de conector DB25 -Soldadura de los cables de sensores y actuadores
Elementos sin utilizar	-Remoción de fines de carrera
Acople entre motor y eje base con juego	-Cambio de prisionero en mal estado -Aplicación de fijador de roscas para evitar desajuste
Ausencia de tarjeta de control y circuitos de accionamiento	-Diseño e implementación de tarjeta de control y circuitos de accionamiento para actuadores.
Ausencia de una interfaz de control	-Diseño e implementación de una HMI para interacción con el usuario

4.1.2 Mantenimiento correctivo del Robot SCARA

Inicialmente la estructura del robot SCARA se encontraba con un ligero desalineamiento de sus eslabones como se indica en la Figura 46, debido a un mal ajuste y ausencia de ciertos elementos de fijación, tales como pernos, prisioneros, tuercas.

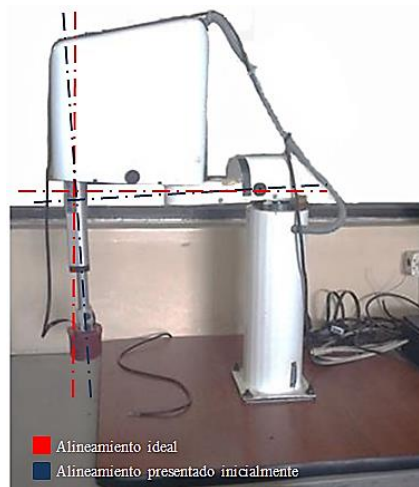


Figura 46 Desalineamiento inicial del robot SCARA

Para darle una adecuada alineación a los eslabones del robot, se desarmó el robot en su totalidad (ver Figura 47), para determinar los elementos faltantes y posteriormente proceder a armar el robot ajustando correctamente cada uno de sus elementos, obteniendo el resultado que se indica en la Figura 48.



Figura 47 Desarmado y evaluación del robot

En la etapa de mantenimiento correctivo del robot se realizaron las siguientes actividades:

- Limpieza general de la estructura.
- Rehacer roscas en agujeros roscados que se encontraban aislados.
- Completar elementos faltantes para el ensamble de la estructura.
- Ajuste de los elementos de sujeción.

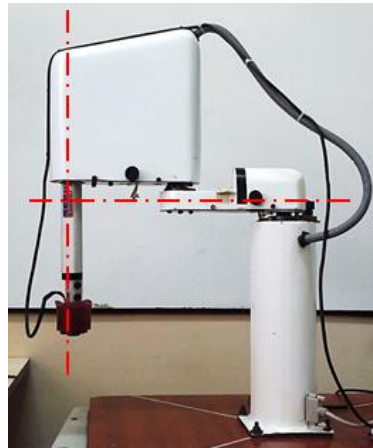


Figura 48 Eslabones del robot alineados correctamente

4.1.3 Adecuación y cableado de sensores y actuadores del robot

4.1.3.1 Cableado

El cableado interno del robot se encontraba roto y algunos cables no estaban adecuadamente ajustados a las borneras del mismo. (Ver Figura 49). El conector que se encuentra en la parte inferior y permite conectar todos los elementos del robot al circuito de control se encontraba en mal estado y no contenía todos los cables, debido a que algunos estaban rotos y/o desoldados como se observa en la Figura 50.

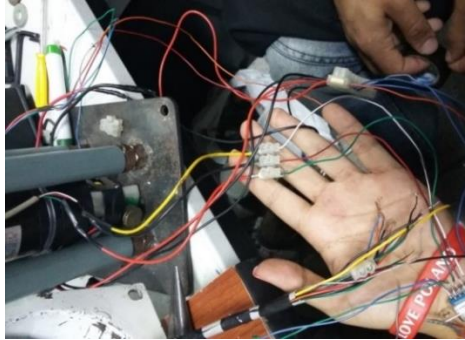


Figura 49 Cables rotos y desconectados de las borneras

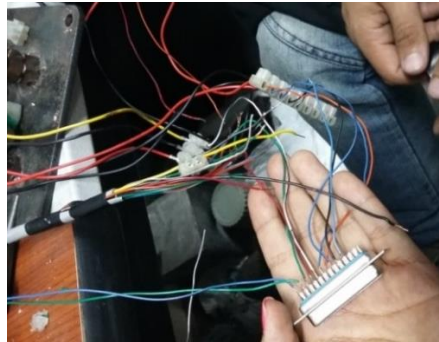


Figura 50 Conector sin cables

Se realizó una prueba de todos los elementos, en el caso de motores y sensores se comprobó el funcionamiento de cada uno por separado. Se colocó un nuevo conector, se reemplazaron los cables rotos y se conectaron correctamente los cables a las borneras comprobando continuidad de cada elemento en el extremo del conector (Ver Figura 51).



Figura 51 Bornera soldada los cables de los elementos del robot

4.1.3.2 Actuadores

El robot cuenta con 4 actuadores, los cuales se enlistan a continuación:

- Dos motores DC para las articulaciones rotacionales
- Un motor DC lineal para la articulación prismática
- Un electroimán como efector final

El motor DC utilizado en las articulaciones rotacionales se indica en la Figura 52, posee una caja de reducción incorporada y presentan las características descritas en la Tabla 54:



Figura 52 Motor DC IG52

Fuente: (Shayang Ye Industrial Co. Ltd., 2016)

Tabla 54

Especificaciones técnicas del motor DC IG52

Característica	Valor
Voltaje Nominal	24 VDC
Reducción	1:53
Velocidad	67 RPM
Corriente nominal	3.85 A
Peso	1.6 kg
Torque	45 kgf-cm

Fuente: (Shayang Ye Industrial Co. Ltd., 2016)

El motor lineal cuenta con sensor resistivo incorporado de 10kΩ (Ver Figura 53), y presenta las características que se muestran en la Tabla 55 :



Figura 53 Actuador lineal para la articulación prismática

Fuente: (SERVOCITY, 2016)

Tabla 55

Especificaciones técnicas del motor ROBOTZONE HDA 8-2

Característica	Valor
Voltaje Nominal	6-19 VDC
Reducción	1:5
Velocidad (sin carga)	0.05 m/s
Velocidad (máx. carga)	0.035 m/s
Relación entrada-salida	42.21 Ω /mm
Corriente sin carga	800 mA

Fuente: (SERVOCITY, 2016)

4.1.3.3 Sensores

Los sensores que utiliza el robot para el posicionamiento de cada articulación rotacional, son potenciómetros acoplados a una caja de reducción como se puede observar en la Figura 54 y se encuentran colocados en cada motor para medir el ángulo de giro del eje del motor.

Los potenciómetros utilizados tienen un valor de 10k Ω , y fue necesario reemplazar el potenciómetro de las dos articulaciones debido a que sus terminales se encontraban rotos.

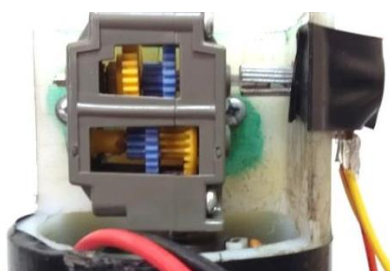


Figura 54 Sensor resistivo utilizado para el posicionamiento del robot

A causa de que los sensores utilizados para posicionamiento no cuentan con especificaciones técnicas por ser diseño propio del robot, es necesario calcular la relación de transmisión entre los engranes de la caja reductora para hallar la relación entre resistencia y ángulo de giro.

Para calcular la relación de transmisión del tren de engranajes, se utiliza el número de dientes de los engranes $Z_1 = 8$, $Z_2 = 34$, $Z_3 = 12$, $Z_4 = 36$, $Z_5 = 12$, $Z_6 = 36$, $Z_7 = 12$, $Z_8 = 36$.

$$i = \frac{34}{8} \cdot \frac{36}{12} \cdot \frac{36}{12} \cdot \frac{36}{12} = 114.75$$

Se sabe que 315° del potenciómetro son $10k\Omega$, por tanto se obtiene que 1° del potenciómetro equivale a 31.74Ω .

Se utiliza la reducción del motor que es 1:53, debido a que el sensor está colocado directamente al motor y no en el eje de salida. Por tanto cada 53 revoluciones del motor, el eje da una revolución.

De acuerdo con la relación anterior 114.75 revoluciones del motor producen 1 revolución del potenciómetro. Como interesa conocer la posición del eje de salida entonces se utiliza la relación de reducción del motor:

$$\frac{114.74 \text{ rev motor}}{53} = 2.16 \text{ rev eje}$$

Se tiene entonces que por cada 2.16 revoluciones del eje, se produce una revolución del potenciómetro. Como se necesita saber la relación de resistencia en función de las revoluciones del eje se calcula cuántos grados gira el potenciómetro en una revolución del eje:

$$1 \text{ rev} \cdot \frac{360^\circ}{2.16 \text{ rev}} = 166.67^\circ$$

Si se necesita 166.66° del potenciómetro para obtener una revolución del eje, entonces se calcula la resistencia total y posteriormente se divide para 360° de manera que se obtiene la resistencia por grado de giro del eje:

$$166.67^\circ \cdot \frac{31.74\Omega}{1^\circ \text{ potenciómetro}} = 5.29k\Omega$$

$$\frac{5.29k\Omega}{360^\circ} = \frac{14.69 \Omega}{1^\circ}$$

4.1.4 Drivers de potencia para el control del robot

Para el cambio de giro del motor lineal se utiliza el driver del circuito integrado L298N, su esquema se indica en la Figura 55. Las características técnicas del circuito integrado L298N se enlistan en la Tabla 56.

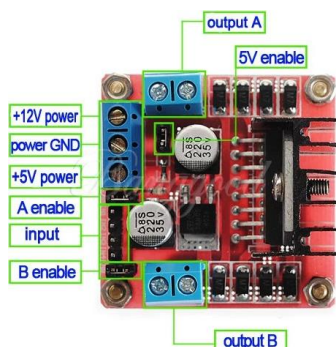


Figura 55 Esquema del puente H L298N

Fuente: (ELECTRONILAB, 2016)

Tabla 56

Especificaciones técnicas del circuito integrado L298N

Característica	Valor
Número de motores	2
Voltaje de entrada	5 a 35 VDC
Corriente de motores	2 A
Corriente de pico	2.5 A
Voltaje alimentación del integrado	5 V
Temperatura de trabajo	-65 °C a 150 °C

Fuente: (ST Microelectronics, 2016)

Para el cambio de giro de los demás motores se utiliza como puente H el driver del circuito integrado VN12SP30, el mismo que permite regular la velocidad de los motores mediante la utilización de PWM, su esquema se indica en la Figura 56. Las características técnicas del circuito integrado VN12SP30 se enlistan en la Tabla 57.

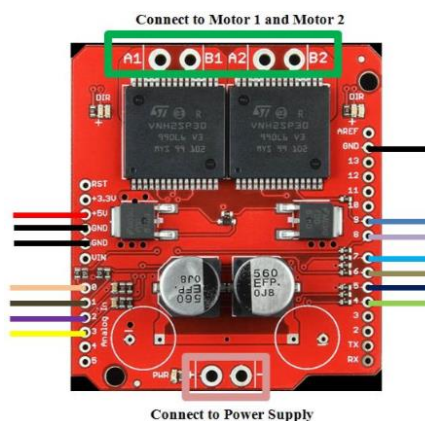


Figura 56 Esquema del driver VN12SP30

Fuente: (Instructables, 2017)

Tabla 57

Especificaciones técnicas del circuito integrado VN12SP30

Característica	Valor
Número de motores	2
Voltaje de entrada	5 a 35 VDC
Corriente de motores	14 A
Corriente de pico	30A
Voltaje alimentación del integrado	5 V

Fuente: (Instructables, 2017)

Para los tres motores se utiliza una alimentación de 19 VDC y los drivers son utilizados para el cambio de giro y control de la velocidad de acuerdo a los requerimientos para control de posición del control PID que se especificó en el capítulo anterior.

4.1.5 Circuito para el control del robot

Para el electroimán utiliza una alimentación 12 V, con un circuito de activación que consiste en un transistor que activa un relé, el cual activa el electroimán.

El circuito de control del motor es activado desde la tarjeta de control de la celda de trabajo, contiene los drivers para los motores y el circuito de activación para el electroimán. Adicionalmente contiene el circuito de acondicionamiento para la lectura de los sensores de posición de cada motor, el cual consiste en la utilización de capacitores para evitar el ruido debido a la larga extensión de los cables. El circuito de control del robot se indica en la Figura 57 y el esquema 3D se indica en la Figura 58.

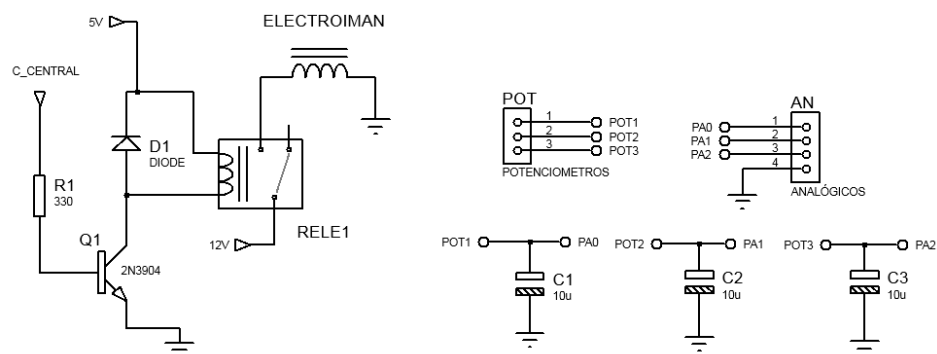


Figura 57 Circuito de control del robot

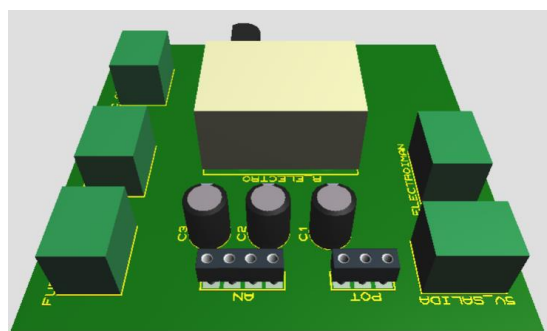


Figura 58 Esquema 3D del circuito de control del robot

Cálculo del ancho de la pista

Para la elaboración de la placa del circuito, se realiza el cálculo del ancho de pista necesario de acuerdo a las condiciones que tendrá el circuito referente a corriente, temperatura y altura.

- Corriente máxima 3 A
- Variación máxima de temperatura 10°C
- Altura: 35 micras = 1 onzas/pie²
- Debido a que la pista es externa se tiene $k_1 = 0.0647$, $k_2 = 0.4281$, $k_3 = 0.6732$.

$$Ancho = \frac{\left(\frac{I}{k_1 \times \Delta T^{k_2}}\right)^{\frac{1}{k_3}}}{1.378 \times Altura}$$

$$Ancho = 50 \text{ mils}$$

4.2 Construcción de la estructura de la banda transportadora y soporte del robot

La estructura de la banda fue construida con perfil en C para el bastidor de la banda y tubos rectangulares para los soportes de la banda y el robot. La construcción fue realizada de acuerdo al procedimiento que se muestra en el flujograma de la Figura 59.

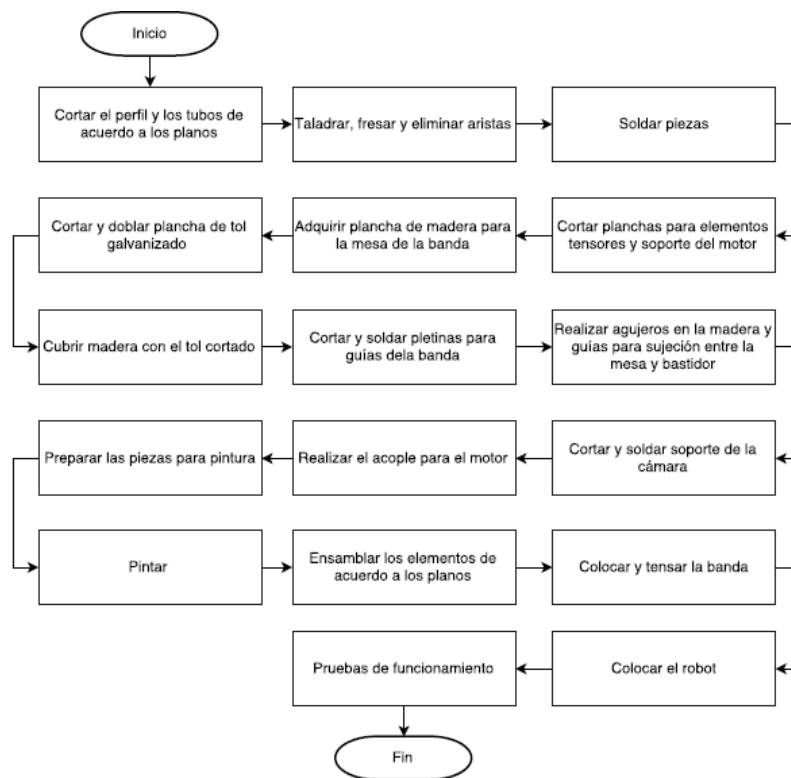


Figura 59 Procedimiento para la construcción de la banda y soporte del robot

4.2.1 Corte y soldadura de los elementos de la banda

Se cortaron los perfiles, tubos y planchas de acuerdo a las dimensiones especificadas en los planos (Ver Figura 60).



Figura 60 Corte y soldadura de las piezas de la banda transportadora

Se taladraron los agujeros en las piezas, adicionalmente se cortaron y doblaron las planchas para los elementos deslizantes de los tensores (Ver Figura 61).



Figura 61 Taladrado y doblado de piezas

4.2.2 Manufactura del acople para el motor

Para el acople del motor se adquirió un eje de acero de transmisión y se realizó torneado de la pieza para conseguir las dimensiones especificadas en plano. Se taladró y se realizó la rosca en los agujeros para los prisioneros (Ver Figura 62).

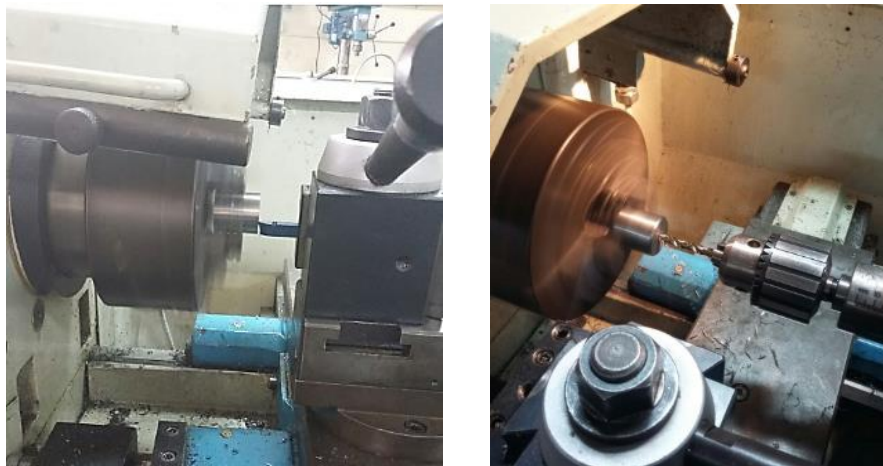


Figura 62 Torneado y taladrado del acople para el motor

4.2.3 Pintura de la estructura

Se preparó las piezas para ser pintadas, se lijó y se limpió con gasolina de manera que se elimine la grasa existente en las mismas. Una vez limpiadas las piezas, se procedió a cubrir las piezas con dos fondos y finalmente se pintó las piezas con laca automotriz como se observa en la Figura 63.



Figura 63 Pintura de las piezas de la banda transportadora

4.2.4 Ensamble final de las partes de la banda y soporte del robot

Se ensambló todas las piezas de la banda de acuerdo a los planos, iniciando con la colocación de los rodillos y el anclaje entre la estructura de la banda y el robot (Ver Figura 64).



Figura 64 Ensamblaje de la estructura

Posteriormente se colocó la banda y el robot en la estructura obteniendo el resultado indicado en la Figura 65.



Figura 65 Estructura final

4.2.4 Pruebas de carga en la banda transportadora

Para comprobar el funcionamiento del motor, se mide la corriente del mismo cuando la banda se encuentra con carga máxima disponible (Ver Figura 66) y sin carga para comprobar que no sea sobrecargado y el torque sea adecuado para poder mover las piezas que se encuentran sobre la banda. Los resultados obtenidos de las mediciones se indican en la Tabla 58.

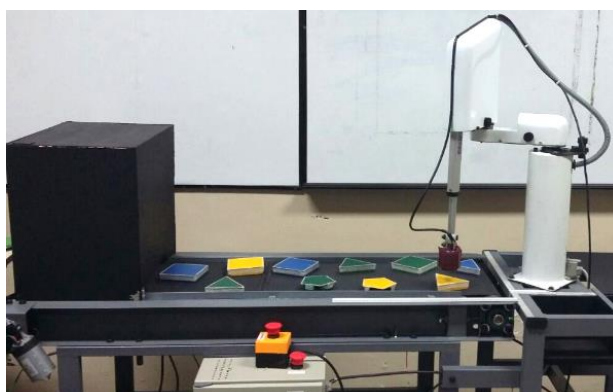


Figura 66 Banda transportadora con carga máxima

Tabla 58

Medición de corriente del motor

Medición	Valor
Corriente del motor sin carga	2.6 [A]
Corriente del motor con carga	3.0 [A]

De acuerdo a las mediciones obtenidas se comprueba que la corriente del motor con carga máxima no supera la corriente nominal de trabajo establecida por el fabricante, por tanto el motor no se encuentra sobrecargado. Además el torque es adecuado para realizar el trabajo y mover las piezas desde el inicio de la banda hasta el robot.

4.3 Construcción del tablero de control

4.3.1 Elaboración de los circuitos electrónicos

Los circuitos electrónicos fueron diseñados de acuerdo a los requerimientos de la celda de trabajo. Se diseñaron 3 circuitos: para el robot, para la banda y para la tarjeta de control, como se indicó en el capítulo anterior. Obteniendo como resultado final los circuitos que se observan en la Figura 67.

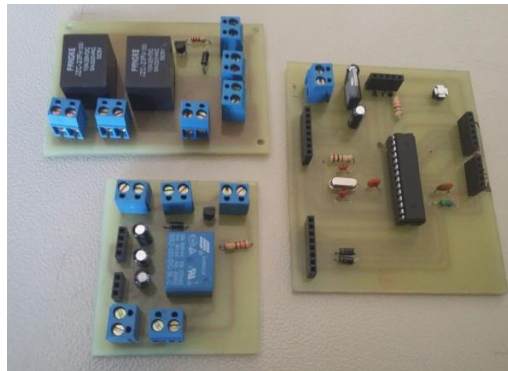


Figura 67 Circuitos electrónicos de la celda de trabajo

4.3.2 Distribución y conexión de los elementos en el tablero de control

Para el tablero de control, adicional a los circuitos electrónicos diseñados, incluye los drivers de los motores del robot y la banda, también se colocaron indicadores visuales, un pulsador de emergencia colocado en el tablero y otro que será ubicado cerca del operario, además se dispone de un switch para el encendido de la celda de

trabajo. En la Figura 68 se indica la vista exterior y la distribución de los elementos del tablero de control.

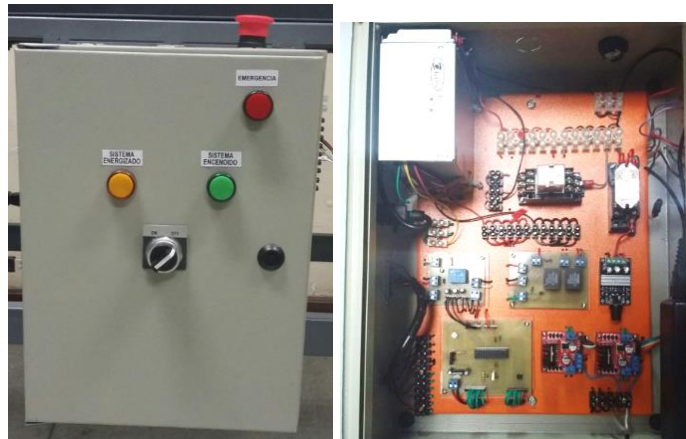


Figura 68 Vista exterior y distribución de los elemento del tablero de control

4.3.3 Pruebas de funcionamiento del tablero de control

En el tablero de control se cuenta con indicadores visuales que muestran el estado de la celda de trabajo. Cuando el indicador visual amarillo está encendido significa que el sistema está energizado. El indicador visual verde indica que el sistema está encendido y funcionando (ver Figura 69).



Figura 69 Indicadores de sistema energizado y encendido

El indicador visual rojo se enciende cuando haya sido presionado alguno de los pulsadores de emergencia, lo cual apaga el sistema cortándole el suministro de energía. (Ver Figura 70). Una vez presionado cualquiera de los pulsadores de emergencia el sistema no puede ser puesto en marcha hasta desenclavar el pulsador.



Figura 70 Indicador de sistema detenido por pulsador de emergencia

4.4 Implementación del sistema de visión artificial

4.4.1 Elementos del sistema de visión artificial

Cámara:

La cámara utilizada en el sistema de visión artificial es una webcam Logitech C300 (ver Figura 71), la cual presenta las características de la Tabla 59.



Figura 71 Webcam C300

Fuente: (tweakers, 2013)

Tabla 59

Especificaciones técnicas Webcam C300

Característica	Valor
Resolución	1.3 MP
Velocidad de video	30 FPS
Conectividad	USB 2.0
Sistema operativo	Windows/Ubuntu

Fuente: (Logitech, 2009)

Iluminación:

Para evitar el ruido de iluminación externa del sistema de visión, se implementa un sistema de iluminación controlado, el cual consta de una caja oscura con iluminación constante y uniforme.

Objeto:

Los objetos utilizados en el sistema de visión artificial están elaborados de tol y balsa. Se utilizó tol en la parte superior de los objetos debido a que se necesita objetos magnéticos para ser atraídos por el electroimán. (Ver Figura 72)



Figura 72 Objetos usados para el reconocimiento del sistema de visión

Computador:

Los requerimientos mínimos de hardware que necesita el computador para un óptimo funcionamiento del sistema de visión se describen en la Tabla 60.

Tabla 60

Requerimientos de software y hardware para el computador

Característica	Valor
Software	
Sistema operativo	Ubuntu 12.04/14.04
Programas instalados	-OpenCV -Python 2.7 -QT Designer 4
Hardware	
RAM	1 GB mínimo
Disco duro	10 GB mínimo

4.4.2 Calibración de la cámara y determinación de las coordenadas de los objetos

Existen varios métodos para la calibración de una cámara que va a ser utilizada en un sistema de visión artificial, en general se pueden utilizar técnicas de calibración coplanares y no-coplanares (Hoyos, Cardona, Capacho, & Orozco, 2010). Para la calibración de la cámara, se utilizó un método coplanar generalizado el cual propone la observación de una plantilla de juego de ajedrez desde varias posiciones (Sánchez, Pagador Carrasco, Sánchez González, Oropesa García, & Gómez Aguilera, 2010) como se indica en la Figura 73, de manera que se pueda obtener la matriz de la cámara, coeficientes de distorsión y conseguir minimizar el error de calibración obteniendo finalmente un valor de 1.16.

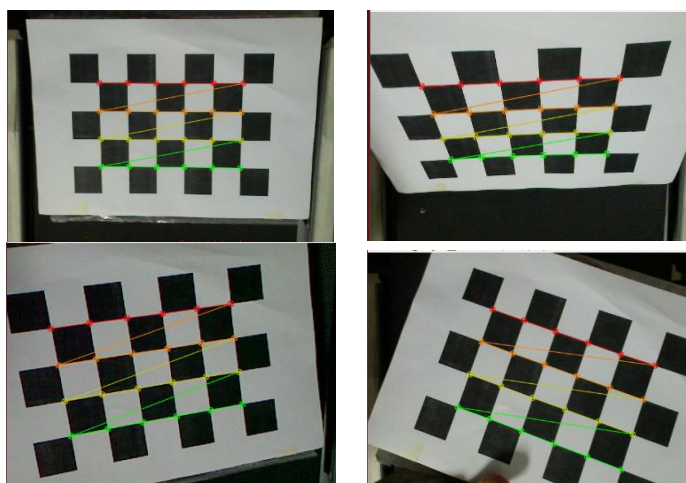


Figura 73 Posiciones del tablero para la calibración de la cámara

A partir de las matrices obtenidas en la calibración, se puede determinar las coordenadas reales (x, y) de los objetos detectados por la cámara. Obteniendo el resultado observado en la Figura 74.

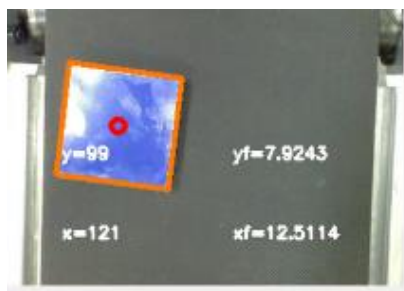


Figura 74 Coordenadas en pixeles y reales del centroide del objeto

4.4.3 Prueba de reconocimiento de colores y formas

Las pruebas del algoritmo de visión artificial se realizaron mediante una interfaz auxiliar creada únicamente con la finalidad de verificar que el sistema tiene un reconocimiento adecuado de formas y de colores (Ver Figura 75).

Para realizar las pruebas se colocaron los objetos sobre diferentes colores de fondo, de manera que se pueda definir las mejores características para el sistema.



Figura 75 Prueba de reconocimiento de colores

4.4.4 Resultados de las pruebas de reconocimiento de colores

En el caso de los objetos de colores oscuros (verde y azul), se presentaban problemas en la detección de formas, debido a que no existía un contraste adecuadamente definido entre las piezas y la base donde estaban colocadas.

Se determinó que para la detección de formas de los objetos que son ubicados sobre una superficie oscura, se necesita un contraste en su borde para ser detectados eficientemente. Para el caso de la banda transportadora por ser de color negro, es necesario pintar de color blanco el borde de las piezas, con la finalidad de no afectar la detección de color y asegurar la detección de las formas (Ver Figura 76).



Figura 76 Prueba de reconocimiento de Formas

4.5 Implementación del algoritmo de Filtro de Kalman

4.5.1 Pruebas y Resultados del Filtro de Kalman

4.5.1.1 Comparación de los datos de mediciones y la predicción del filtro

Se realizaron pruebas en la zona de trabajo de la cámara para establecer el error en el proceso de predicción de la posición del objeto, mientras es posible hacer la corrección y actualización del filtro utilizando los datos de la cámara. Los valores obtenidos se enlistan en la Tabla 61 y fueron representados en la Figura 77 donde se puede observar que los datos de las mediciones y los calculados por el filtro de Kalman son muy aproximados.

Tabla 61

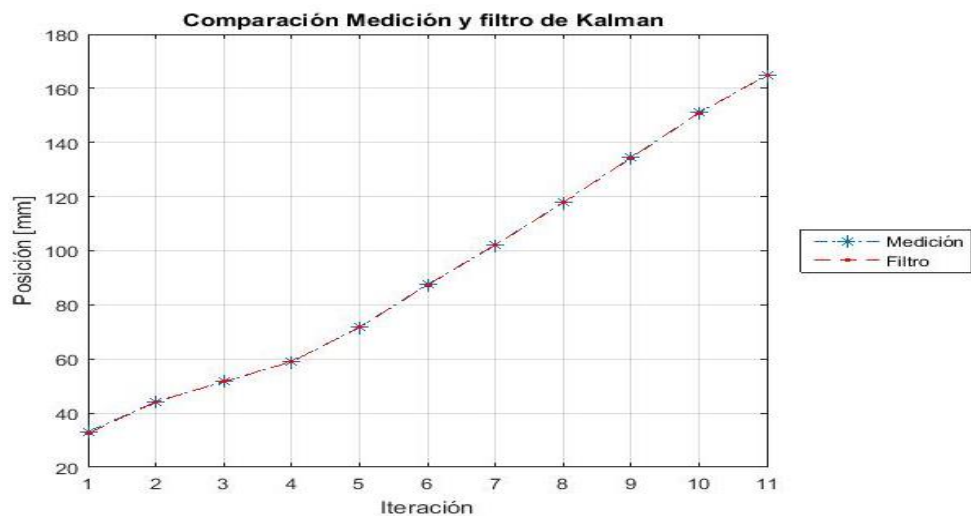
Datos de medición de la cámara y Filtro de Kalman

Dato	Medida [mm]	Filtro [mm]
1	33.156	32.479
2	44.208	44.128
3	51.576	51.642
4	58.994	59.006
5	71.838	71.714
6	87.495	87.290
7	102.231	102.077
8	117.888	117.723
9	134.466	134.288
10	151.044	150.889
11	164.859	164.809

4.5.1.2 Resultados de la predicción

Para definir los resultados de la comparación entre las mediciones obtenidas por la cámara web y los valores calculados por el Filtro de Kalman, se determina el error individual de cada dato y el error promedio de la predicción de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$Error \% = \left| \frac{medida - predicción\ filtro}{medida} \right| \times 100$$

**Figura 77** Comparación Medición y Filtro de Kalman

En la Tabla 62 se enlista los errores porcentuales obtenidos para cada iteración. Se puede observar que el error de la predicción va disminuyendo en función de cada actualización del filtro, obteniendo en la última predicción un error de 0.03% y un error promedio de 0.31% en los resultados del filtro en la etapa de actualización.

Tabla 62

Cálculo del error en cada predicción

Dato	Medida [mm]	Filtro [mm]	Error [%]
1	33.156	32.479	2.04
2	44.208	44.128	0.18
3	51.576	51.642	0.13
4	58.994	59.006	0.11
5	71.838	71.714	0.17
6	87.495	87.290	0.23
7	102.231	102.077	0.15
8	117.888	117.723	0.14
9	134.466	134.288	0.13
10	151.044	150.889	0.10
11	164.859	164.809	0.03

4.5.1.3 Comparación de la posición final de la pieza y la predicción del filtro

Esta comparación se realiza en todo el proceso de predicción, es decir mientras realiza actualizaciones y posteriormente realiza solo predicción (Desde que es detectado por el sistema de visión hasta que es tomado por el robot). Se realizaron varias pruebas: por forma y color con todos los objetos y con cada uno de ellos.

4.5.1.3.1 Prueba por forma

En la Figura 78 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando triángulos, cuadrados y pentágonos alternadamente.



Figura 78 Comparación entre Predicción de Filtro y Posición real

Prueba con triángulos

En la Figura 79 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando únicamente triángulos.

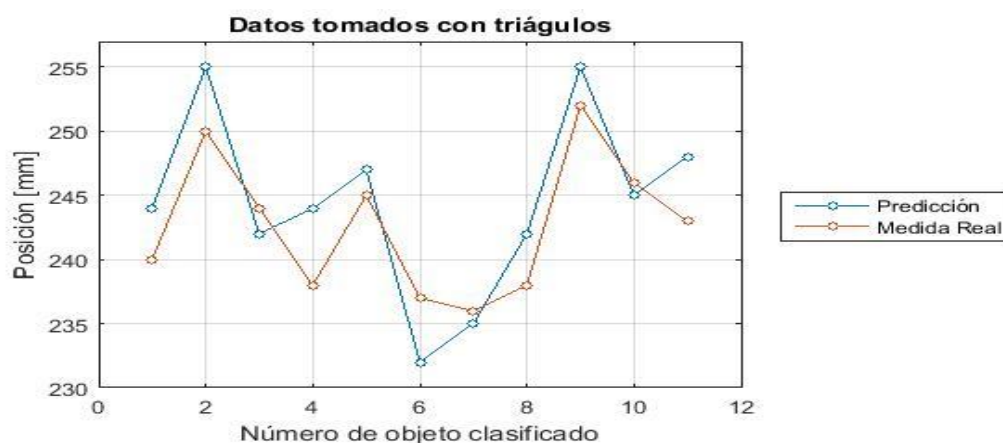


Figura 79 Comparación entre Predicción y Posición real con triángulos

Prueba con cuadrados

En la Figura 80 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando únicamente cuadrados.

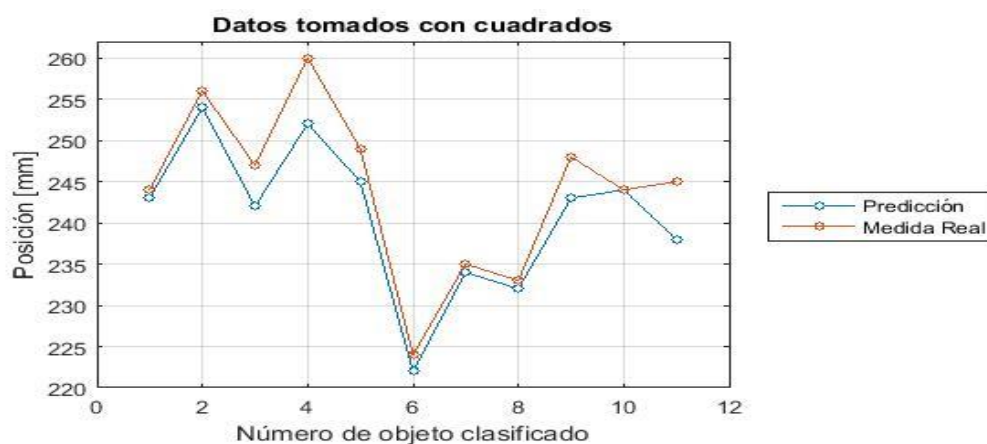


Figura 80 Comparación entre Predicción y Posición real con cuadrados

Prueba con pentágonos

En la Figura 81 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando únicamente pentágonos.

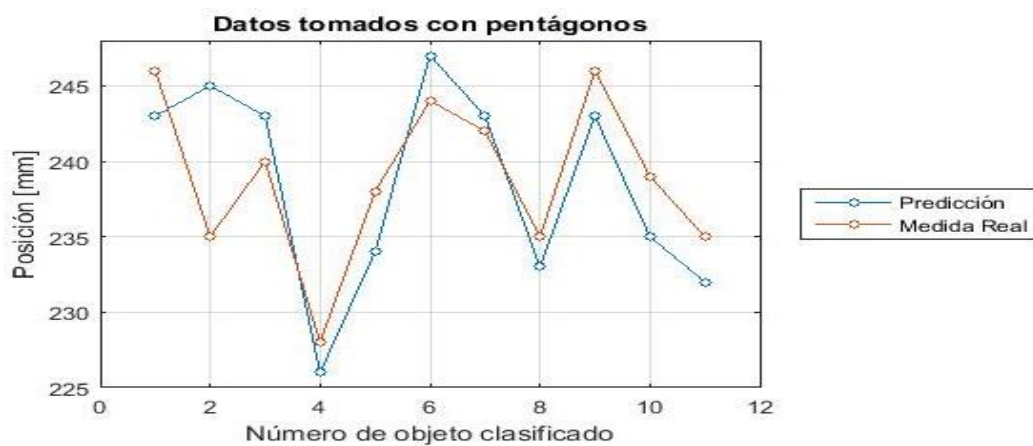


Figura 81 Comparación entre Predicción y Posición real con pentágonos

4.5.1.3.2 Resultados de las pruebas por forma

De acuerdo a los datos anteriores, se obtienen los errores de cada una de las pruebas realizadas y se indican en la Tabla 63. Se puede observar que el error incrementa comparado con la predicción mientras el filtro puede actualizar los datos.

Tabla 63

Resultados de las pruebas realizadas por forma

Prueba	Error Promedio [%]
Por Forma	1.46
Triángulos	1.41
Cuadrados	1.35
Pentágonos	1.40

El error obtenido realizando las pruebas de cada figura individualmente se aproximan al error obtenido en la prueba colocando las piezas alternadamente.

4.5.1.3.3 Prueba por color

En la Figura 82 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a color: utilizando verde, azul y amarillo alternadamente.

**Figura 82** Comparación entre Predicción de Filtro y Posición real clasificación por color

Prueba con azul

En la Figura 83 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando únicamente objetos color azul.

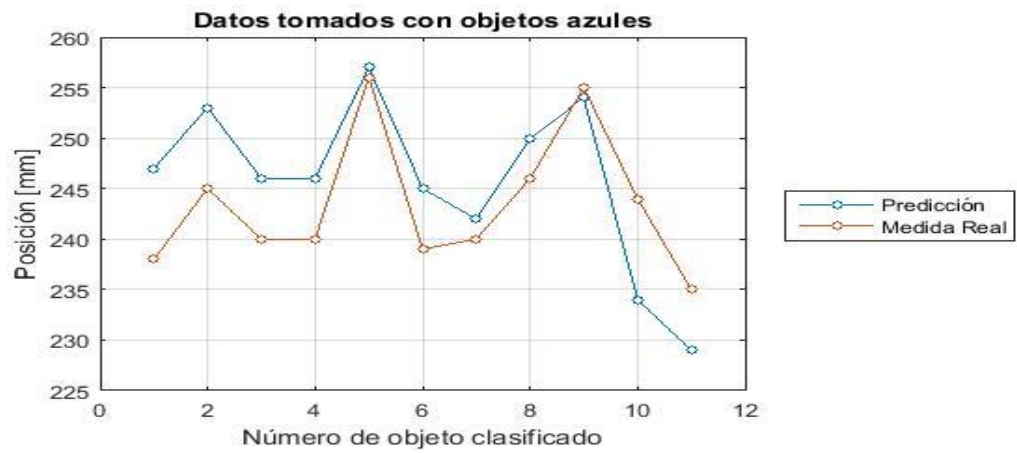


Figura 83 Comparación entre Predicción y Posición real con objetos azules

Prueba con amarillo

En la Figura 84 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando únicamente objetos color amarillo.

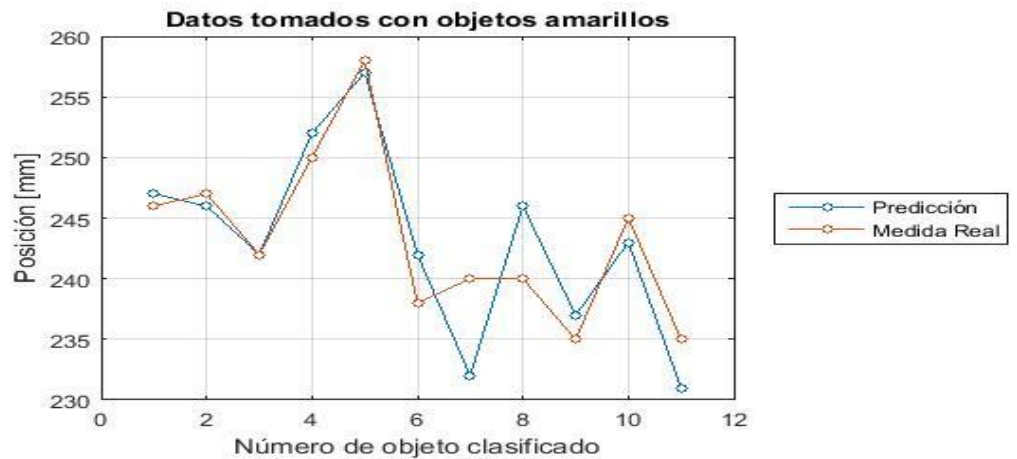


Figura 84 Comparación entre Predicción y Posición real con objetos amarillos

Prueba con verde

En la Figura 85 se observa predicción realizada por el filtro y la posición real para objetos clasificados de acuerdo a forma, utilizando únicamente objetos color verde.

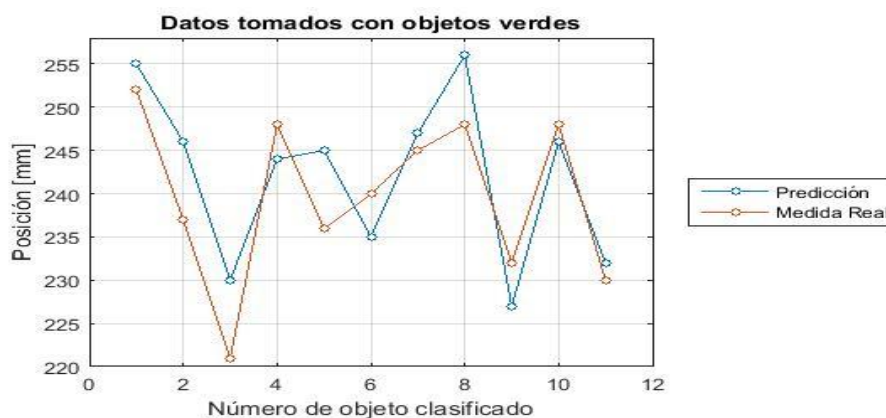


Figura 85 Comparación entre Predicción y Posición real con objetos verdes

4.5.1.3.4 Resultados de las pruebas por color

De acuerdo a los datos obtenidos, se obtienen los errores de cada una de las pruebas realizadas y se indican en la Tabla 64. Se puede observar que el error incrementa comparado con la predicción mientras el filtro puede actualizar los datos.

Además presenta un error mayor que la predicción por forma, esto se debe a los rangos de detección de colores definidos en el algoritmo de programación para el sistema de visión artificial.

Tabla 64

Resultados de las pruebas realizadas por color

Prueba	Error Promedio [%]
Por Color	2.05
Azul	2.13
Amarillo	1.09
Verde	3.87

Se observa que el error obtenido realizando las pruebas de cada color individualmente varía y el color verde presenta el mayor error. Sin embargo los errores obtenidos se consideran aceptables para el posicionamiento del robot.

4.5.1.4 Comparación de la posición final de la pieza y la predicción con filtro y sin filtro

En la Figura 86 se observa la posición real para objetos, la predicción realizada por el filtro y una predicción básica utilizando movimiento rectilíneo uniforme considerando que la velocidad de la banda es constante.

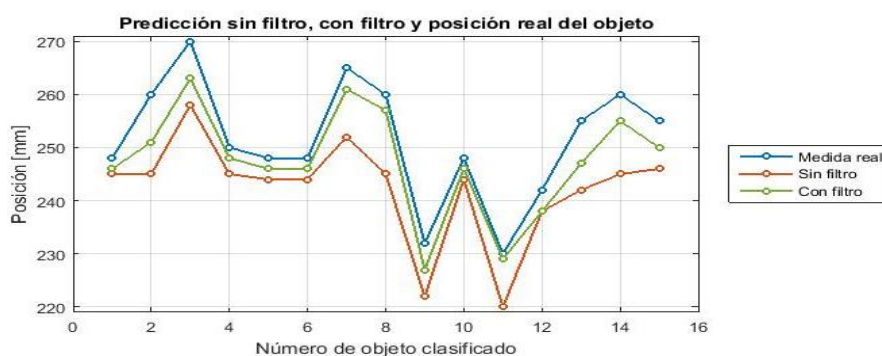


Figura 86 Comparación entre Predicción de con filtro, sin filtro y posición real

4.5.3.5 Resultados de la comparación con la utilización de filtro y sin filtro

De acuerdo a los datos anteriores, se obtiene la gráfica de errores individuales de cada una de las pruebas realizadas (Ver Figura 87). Se puede observar que el error sin utilizar Filtro de Kalman es superior al error con filtro, por lo que se tiene un mejor posicionamiento del robot con respecto a la pieza utilizando el filtro de Kalman.

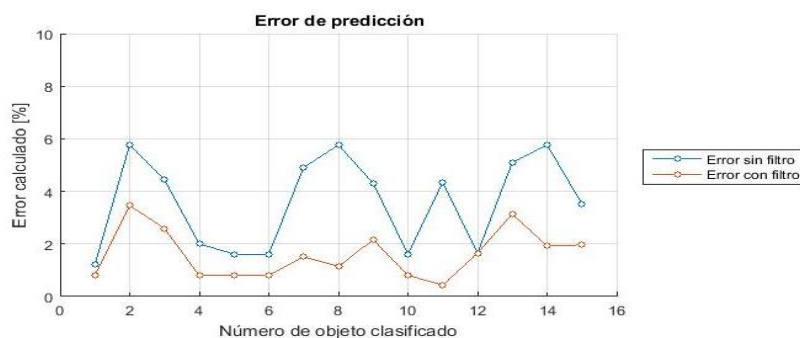


Figura 87 Error en la predicción con filtro y sin filtro

De acuerdo a la Figura 86 y Figura 87 se puede observar que en algunos casos los resultados obtenidos con el filtro de Kalman y las ecuaciones de movimiento rectilíneo uniforme son aproximados, mientras que en otros casos presentan una gran diferencia. Esto se debe principalmente a que en ciertas ocasiones debido a factores externos tales como deslizamiento de la banda, la velocidad varía momentáneamente.

En el caso del filtro de Kalman cuando se produce la variación de velocidad mientras el objeto se encuentra en el rango de visión de la cámara, la posición se corrige debido a las mediciones continuas del centroide del objeto. Por el contrario, para el caso del movimiento rectilíneo uniforme en las ecuaciones se define una velocidad constante en todo momento, por lo que no considera los factores externos y continúa su predicción. En la Tabla 65 se indica el error promedio de cada una de las pruebas.

Tabla 65

Resultados de las pruebas realizadas con filtro y sin filtro

Prueba	Error Promedio [%]
Con Filtro de Kalman	1.60
Sin filtro de Kalman	3.95

4.6 Análisis de ventajas de la implementación del Filtro de Kalman en la producción

De acuerdo a la justificación del proyecto se plantea la utilización de una celda de trabajo automatizada que permita clasificar objetos en movimiento. De manera que aplicando el sistema a nivel industrial significaría un aumento de producción y disminución de tiempos de operación, implicando un ahorro económico.

4.6.1 Análisis de disminución de tiempo

Es importante destacar que el tiempo de producción depende del proceso industrial en el que sea aplicado el sistema. Por tanto, para realizar el análisis se

consideró los datos experimentales tomados de la celda de trabajo construida. Sin embargo en cualquier proceso que sea aplicado se tendría una optimización del mismo.

Se analiza el tiempo que toma la clasificación de un objeto desde que entra a la banda hasta que es colocado en su posición final. El tiempo que normalmente toma clasificar una pieza es 23.73 seg considerando que únicamente se encuentra una pieza sobre la banda. En el caso de colocar más de un objeto en la banda hay que tomar en cuenta el intervalo de tiempo en el que se coloca. (Ver Figura 88) Se considerando dos casos:

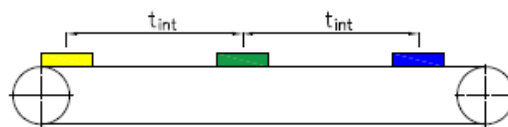


Figura 88 Intervalo de tiempo entre piezas

Caso 1: Al llegar a una posición definida, la banda se detiene para que el robot pueda tomar el objeto y después continúa su funcionamiento.

Desde el segundo objeto, al tiempo anterior se le debe sumar el tiempo que se detiene la banda para tomar los objetos que están delante. El número de objetos se define como n , de acuerdo a la ecuación (4.1):

$$t = 23.73 + (n - 1) \times t_{int} + (n - 2) \times 2t_{robot} \quad \text{para } n > 2 \quad (4.1)$$

Desde el tercer objeto en adelante se suma dos veces el tiempo de la banda detenida. (El tiempo de la banda detenida, es el tiempo que tarda en posicionarse el robot $t_{robot} = 3.55$ [seg]).

Se realiza el análisis de tiempo para la clasificación de los 11 objetos disponibles, aplicando el caso 1 con un tiempo de intervalo de 7 segundos.

$$t = 157.63 \text{ [seg]}$$

Caso 2: La banda trabaja continuamente mientras el robot clasifica las piezas.

Para este caso únicamente se considera el tiempo del intervalo, debido a que la banda no se detiene mientras el robot realiza el trabajo. Cumpliendo la siguiente ecuación:

$$t = 23.73 + (n - 1) \times t_{int} \quad (4.2)$$

Se realiza el análisis de tiempo para la clasificación de los 11 objetos disponibles, de la misma manera que en el caso anterior, con un tiempo de intervalo de 7 segundos.

$$t = 93.73 \text{ [seg]}$$

Con los datos obtenidos se realiza el análisis respectivo de los resultados en la Tabla 66. Se observa que para la clasificación de 11 objetos, el tiempo que se necesita al utilizar el sistema convencional deteniendo la banda es 157.63 seg, mientras que aplicando el sistema de predicción de manera que la banda trabaje continuamente se necesita 93.73 seg, resultando en una disminución de tiempo en 40.53%.

Tabla 66

Comparación en tiempo de los casos propuestos

Caso	Tiempo [seg]	Diferencia de tiempo [seg]	Disminución de tiempo [%]
1	157.63		
2	93.73	63.9	40.53

4.6.2 Análisis de aumento de producción

Para analizar el aumento de producción que permite la utilización de predicción en el proceso, se considera las 8 horas de trabajo diarias. Se transforma el tiempo en segundos para trabajar con las ecuaciones descritas anteriormente y se mantiene el valor de $t_{int} = 7 \text{ [seg]}$.

$$t = 28\,800 \text{ [seg]}$$

De acuerdo al caso 1, despejando de la ecuación (4.1) el número de piezas, se tiene: $n = 2042$

De acuerdo al caso 2, despejando de la ecuación (4.2) el número de piezas, se tiene: $n = 4112$

Con los datos obtenidos se realiza el análisis respectivo de los resultados en la Tabla 67. Se observa que para un tiempo de 8 horas al utilizar el sistema convencional deteniendo la banda se puede clasificar 2042 piezas, mientras que aplicando el sistema de predicción de manera que la banda trabaje continuamente se puede clasificar 4112, resultando en un aumento de producción de 50.34%

Tabla 67

Comparación en volumen de producción en 8 horas de los casos propuestos

Caso	Número de piezas	Aumento de producción	Aumento de producción [%]
1	2042	2070	50.34
2	4112		

4.7 Resumen

La construcción de la celda de trabajo es desarrollada en varias etapas. Se empieza con la reparación del robot SCARA lo cual incluye: mantenimiento, cableado de sensores y actuadores, diseño de una placa PCB para el control del mismo. A continuación, se construye la estructura de la banda transportadora y la mesa para el robot. Luego se implementa el tablero de control al sistema.

Una vez ensamblada la estructura se implementa el sistema de visión artificial, al cual se le calibra de manera que se pueda obtener la posición real de los objetos detectados por la cámara. Para asegurar la iluminación constante del sistema de visión, se crea un ambiente controlado y se realizan pruebas para asegurar la detección adecuada de los objetos de acuerdo a los requerimientos.

Se implementa la predicción con Filtro de Kalman y se realizan pruebas para determinar los beneficios de su aplicación respecto a otro tipo de predicciones y su funcionamiento mientras se realiza el sensado y cuando el objeto sale del área de visión de la cámara

Por último se realiza un análisis de las ventajas de la aplicación del Filtro de Kalman en la producción, para determinar el porcentaje de tiempo que permite ahorrar y de aumento de producción posible en un tiempo determinado, comparando con los procesos convencionales actuales.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

5.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó una celda de trabajo para el robot SCARA, el cual dispone de un controlador central que coordina las operaciones de cada uno de los elementos que conforman el sistema. La celda de trabajo es capaz de realizar la detección y posterior clasificación de piezas de acuerdo a su forma o color utilizando un sistema de visión artificial para el reconocimiento de las piezas y aplicando el algoritmo del Filtro de Kalman para la predicción de su posición, de manera que el robot tome el objeto mientras la banda transportadora se encuentra en movimiento. Adicionalmente la celda cuenta con una HMI de supervisión del proceso y en el espacio de trabajo del operario se dispone de un pulsador de emergencia para que el operario pueda ubicarse a cierta distancia de la celda de manera que se garantice su seguridad.
- Se reparó el robot SCARA, partiendo de la comprobación del funcionamiento de cada uno de sus sensores y actuadores y se realizó el cableado respectivo. Adicionalmente, se corrigió el desalineamiento de sus eslabones mediante la reparación de sus elementos de sujeción y se colocó bocines en los ejes de las articulaciones que presentaban desgaste.
- Se diseñó y construyó una banda transportadora de 120×48cm, cuyo movimiento es producido por un motor DC de 24W con un torque nominal de 8Nm. La banda transportadora es capaz de soportar una carga continua de

0.424 ton/h a una velocidad máxima de 0.15 m/s. Para su aplicación en el sistema actual, la banda trabaja a 0.06 m/s debido a las limitaciones físicas del robot SCARA. Es activada mediante un control ON/OFF desde la HMI de control del sistema de la celda de trabajo.

- El desarrollo del sistema de visión artificial se realizó en Python. Para el adecuado funcionamiento del sistema se implementó un ambiente controlado de iluminación. El algoritmo permite al sistema reconocer objetos por forma: triángulo, cuadrado y pentágono y por color: amarillo, verde y azul, la selección del tipo de clasificación se lo realiza desde la HMI de control permitiendo visualizar en tiempo real la detección de los objetos.
- La implementación del filtro del Kalman en el sistema permite concluir que la aplicación del mismo consigue disminuir en un 2.35% el error comparado con utilizar un tipo de predicción básica como las ecuaciones de movimiento rectilíneo uniforme. Adicionalmente se demostró que la implementación del Filtro de Kalman en un proceso de producción considerando las condiciones del prototipo fabricado permite disminuir en un 40.53% los tiempos de manejo de la pieza y aumentar en 50.34% el volumen de producción.
- Se concluye que la implementación del sistema de visión artificial permite reconocer las piezas que se encuentran sobre la banda transportadora de acuerdo a su forma o color. Los resultados del filtro de Kalman poseen un error promedio de 1.46% en la clasificación de acuerdo a forma y de 2.05% de acuerdo a color, resultados que son admisibles para el adecuado funcionamiento de la celda de trabajo. Es importante considerar que existe un error de posicionamiento del robot debido al juego mecánico de las cajas de reducción presentes en los actuadores del mismo.

5.2 Recomendaciones

- Para un funcionamiento más eficiente de la celda de trabajo y menores tiempos de proceso, se recomienda cambiar el robot actual debido a que presenta limitaciones mecánicas. Reemplazándolo por un robot SCARA de alta velocidad de manera que se pueda incrementar el número de piezas clasificadas y la exactitud del robot para tomar el objeto.
- Se recomienda verificar que la banda se encuentre tensionada correctamente para evitar desalineamiento de la misma. Además se puede sensar la velocidad del motor de la banda, de manera que permita disminuir el error en la predicción del filtro cuando el objeto sale del área de visión de la cámara.
- Para el correcto reconocimiento de colores es importante que los objetos no reflejen la luz, de manera que no se distorsionen los colores al momento de ser visualizados por la cámara por lo que se recomienda utilizar colores mate. Y se debe considerar que la iluminación debe ser constante en todo momento.
- Debido a que el error de predicción aumenta en el rango que el objeto no es visualizado por la cámara, se recomienda cambiar la posición de la cámara de manera que pueda visualizar toda la longitud de la banda y el algoritmo del filtro de Kalman pueda realizar la actualización de los datos en todo el proceso.

5.3 Trabajos futuros

Como trabajo futuro se propone la construcción de otro robot SCARA que sea colocado en la celda de trabajo construida, desarrollando robótica colaborativa entre ellos para realizar la clasificación de piezas de manera que se pueda aumentar la cantidad de objetos que se pueden clasificar en un tiempo determinado. Se pretende que si un robot no está disponible para tomar el objeto, el siguiente robot pueda

clasificarlo representado una simulación de un proceso industrial real. De esta manera se puedan establecer valores más aproximados acerca de disminución de tiempos y aumento de productividad gracias a la implementación de Filtro de Kalman. Se propone el esquema indicado en la Figura 89.

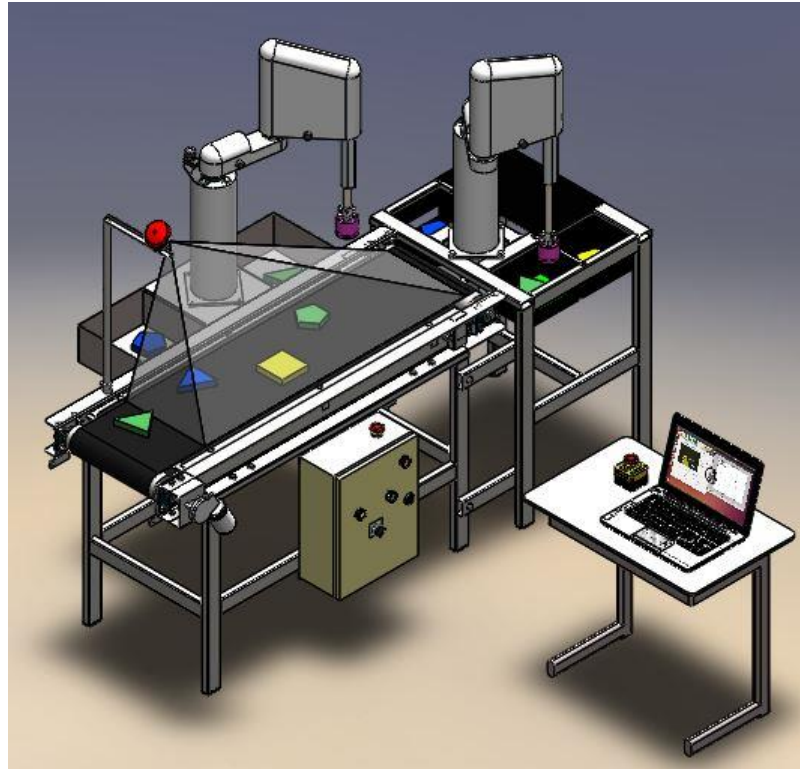


Figura 89 Esquema propuesto para trabajos futuros

BIBLIOGRAFÍA

ADELCA. (2014). *Catálogo de productos*. Quito: ADELCA.

Atmel. (2016). *Datasheet ATmega328/328P*. San José: Atmel.

Auger, F., Hilaret, M., Guerrero, J., Monmasson, E., Orłowska, T., & Katsura, S. (2013). *Industrial Application of the Kalman Filter: A Review*. París: IEEE.

Bandas & Bandas S.A. (2016). Hoja técnica bandas PVC.

Bandas & Bandas S.A. (s.f.). *Bandas Transportadoras*. Obtenido de <http://www.bandasybandas.com/bandas/bandas-transportadoras-.html>

Barranco, A., Martínez Díaz, S., & Gómez, J. (2012). *Visión estereoscópica por computador con Matlab y OpenCV*. México: Instituto Tecnológico de La Paz.

Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill.

BOSCH. (2016). Obtenido de <http://www.bosch-ibusiness.com/boaaelmoocs/category/CEP/283>

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México D.F.: Mc Graw-Hill.

Caionix Automations. (21 de febrero de 2016). *THL700 SCARA Soldering - Toshiba Machine*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=0dzFwa2NJ1M>

- Chen, S. Y. (2011). *Kalman Filter for Robot Vision*. Hangzhou: IEEE.
- CMB-CETA - Teach Industrial. (2009). *Bearings*. Chengdú: CMB-CETA- Teach Industrial.
- Conveyor Equipment Manufacturers Association CEMA. (2002). *Belt Conveyors for Bulk Materials*. United States of America.
- DUNLOP. (2004). *Conveyor Belt Technique: Design and Calculation*. United Kingdom.
- DX Deal Extreme. (07 de Julio de 2013). Obtenido de <http://www.dx.com/p/pl2303hx-usb-to-ttl-converter-adapter-module-w-dubond-thread-blue-224704#.WD2f6rLhDIU>
- ECOBALSA. (2004). *Ficha técnica de la madera balsa*.
- ELECTRONILAB. (2016). Obtenido de <http://electronilab.co/tienda/controlador-pwm-de-velocidad-de-motor-dc-6v-28v-3a/>
- ELECTRONILAB. (2016). *ELECTRONILAB*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/driver-dual-para-motores-full-bridge-1298n/>
- ESBELT. (2013). *Catálogo de bandas transportadoras Serie ASTER*.
- Espíndola, A., Hernández, B., & Rico, J. (2011). *Mecanismos Planos de Cuatro Barras, Rotabilidad y Criterio de Grashof*. Celaya: Instituto Tecnológico de Celaya.
- FAG Sales Europe GmbH. (2000). *Rodamientos FAG. Catálogo WL41 520/3 SB*. Barcelona: FAG.
- Ferdinand , P. B., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek., D. F. (2011). *Statics and Mechanics of Materials*. New York: McGraw-Hill.

- Ficalora, J. P., & Cohen, L. (2009). *Quality Function Deployment and SIX SIGMA, A QFD Handbook*. Crawfordsville, Indiana: Prentice Hall.
- Forbo Movement Systems. (2014). *Siegling transilon: bandas de transporte y procesamiento*. Hannover: Forbo Group.
- García, A., & Castillo, F. (2007). *CIM: el computador en la automatización de la producción*. La Mancha - España: Ediciones de la universidad de Castilla - La Mancha.
- González Marcos, A., Martínez, F. X., Pernía Espinoza, A. V., Alba, F., Catejón Limas, M., Ordieres, J., & Vergara, E. (2006). *Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial*. España: Servicio de Publicaciones Universidad de la Rioja.
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales Procesos y Sistemas*. México: Prentice-Hall.
- HITECH. (2016). *Datasheet Servomotor HS-311*. HITEC.
- Hoyos, J., Cardona, J., Capacho, L. M., & Orozco, L. F. (2010). *Técnicas de Calibración de Cámaras para visión estéreo y reconstrucción*. Armenia: XV SIMPOSIO DE TRATAMIENTO DE SEÑALES, IMÁGENES Y VISIÓN ARTIFICIAL .
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2008). *Tubos de acero al carbono con costura, negros y galvanizados. Requisitos*. Quito: INEN.
- Instructables*. (2017). Obtenido de <http://www.instructables.com/id/Monster-Motor-Shield-VNH2SP30/>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura: Ingeniería y Tecnología*. México: Prentice-Hall.
- Larraioz Electrónica. (2015). Obtenido de <http://larraioz.com/en/?p=778&lang=en>

- Logitech. (2009). *Quick-start guide*. México: Logitech.
- Lorenzo, G. (2006). *Automatización de una planta industrial*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Low, K.-H. (2007). *Industrial Robotics: programming, simulation and applications*. Alemania: pro Literatur Verlag.
- Marín Paniagua, L. (2011). *Navegación de un robot móvil de configuración diferencial basada en fusión sensorial*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia .
- Mitsantisuk, C., Katsura, S., & Ohishi, K. (2009). *Kalman-Filter-Based Sensor Integration of Variable Power Assist Control Based on Human Stiffness Estimation*. Yokohama: IEE.
- Motai, Y., & Kosaka, A. (2008). *Hand–Eye Calibration Applied to Viewpoint Selection for Robotic Vision*. Shinjuku: IEEE.
- OPAC Elementos normalizados. (2015). *Chavetas*. Barcelona: OPAC.
- Pajares Martinzans, G., & De la Cruz García, J. (2008). *Visión por computador: Imágenes y Aplicaciones*. RA-MA S.A.
- Pereira Ruiz, S. (2009). *Localización de robots mediante Filtro de Kalman*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez Díaz, F., & Berenguel Soria, M. (2004). *Control y Robótica en la Agricultura*. Almería: Escobar Impresiones.
- ROULUNDS. (2001). *Conveyor Belts*. Denmark.
- Sánchez, J. A., Pagador Carrasco, J. B., Sánchez Gonzáles, P., Oropesa García, I., & Gómez Aguilera, E. J. (2010). *Procedimiento automático para el calibrado*

de cámaras: Estudio comparativo de la distorsión en diferentes combinaciones de cámaras y ópticas laparoscópicas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Senplades. (2013). *Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017.* Quito.

SERVOCITY. (2016). Obtenido de https://www.servocity.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/h/d/hda8_1.jpg

Shayang Ye Industrial Co. Ltd. (2016). *SuperDroid Robots.* Obtenido de <http://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/ig52-04-24vdc-136-rpm-gear-motor/872/>

Shigley, J. E., & Uicker, J. J. (1996). *Teoría de máquinas y mecanismos.* México: McGraw-Hill.

ST Microelectronics. (2016). *Datasheet L298N.* Ginebra: ST Microelectronics. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/driver-dual-para-motores-full-bridge-l298n/>

Studwell, L. (14 de octubre de 2015). *RoboticTips.* Obtenido de The future of automation & Robotics in the food industry: <http://www.robotictips.com/the-future-of-automation-robotics-in-the-food-industry/>

Toshiba machine Industrial robotics. (2015). *INDUSTRY ARTICLES.* Recuperado el 16 de septiembre de 2016, de Toshiba robotics: <http://tmrobotics.com/>

tweakers. (junio de 2013). Obtenido de <https://tweakers.net/pricewatch/244122/logitech-webcam-c300.html>

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Diseño y desarrollo de productos.* México: McGraw-Hill.

- Vélez Serrano, J. F., Moreno Díaz, A. B., & Sánchez Calle, Á. (2003). *Visión por computador*. Madrid.
- Vigouroux Cavolina, D. P. (2010). *Implementación de Unidad de Mediciones Inerciales (IMU) para robótica utilizando Filtro de Kalman*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar-Venezuela.
- Welch, G., & Bishop, G. (2001). *An Introduction to the Kalman Filter*. North Carolina: Chapel Hill.
- Won , P., Golnaraghi, F., & Melek, W. W. (2009). *A Fastening Tool Tracking System Using an IMU and a Position Sensor With Kalman Filter and a Fuzzy Expert System*. Waterloo: IEEE.