UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS APLICADAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE VOLTEO PARA EL COMPARTIMIENTO DE MOTOR PARA LA LÍNEA DE ENSAMBLAJE DEL VEHÍCULO MODELO M4 PARA LA EMPRESA CIAUTO.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

AUTOR:

ANDRÉS SEBASTIÁN ARTEAGA CABEZAS

DIRECTOR: ING. RICHARD ALFONSO ANDRADE ALFARO M.Sc.

D. M. QUITO

2018

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Andrés Sebastián Arteaga Cabezas, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional, y que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por Normativa Institucional vigente.

_____

Andrés Sebastián Arteaga Cabezas

C.C. 1713981866

CERTIFICACIÓN

El docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología Aplicadas Ingeniero Richard Alfonso Andrade Alfaro MSc.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación denominado “Tema del proyecto de titulación”, fue desarrollado por el Sr Andrés Sebastián Arteaga Cabezas, ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

_____

Ing. Richard Alfonso Andrade Alfaro M.Sc.

C.C. 1717943698

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme permitido cumplir esta meta.

En el presente trabajo se plasma el esfuerzo directo e indirecto de muchas personas que colaboraron leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dándome ánimo y sobre todo por proporcionarme las facilidades para su desarrollo.

Agradezco a la empresa Ciudad del Auto CIAUTO CIA. LTDA., dedicada al ensamblaje de vehículos de la marca Great Wall, por brindarme las facilidades para realizar el presente proyecto de titulación, al equipo humano de la Universidad Internacional del Ecuador que, a través de su experiencia y buena voluntad, supieron orientarme durante los 5 años de mi formación profesional y en especial a mi Director de trabajo de titulación Ing. Richard Andrade por su estoicismo y voluntad.

A mi familia, quienes día tras día supieron inculcar en mí, que por más obscura o difícil que la vida se torne, con calma, esfuerzo y dedicación se puede salir siempre adelante.

Finalmente, pero no menos importante a mis dos mejores amigos Carlos Andrés y Esteban Xavier con quienes desde el colegio hemos permanecido unidos y una vez más podemos decir “Salimos”

A todos ellos muchas gracias.

Andrés Sebastián Arteaga Cabezas

DEDICATORIA

A la memoria de un ángel a quien Dios nombró antes de tiempo, dejando en este mundo una huella imborrable.

A mi familia, amigos, quienes siempre estuvieron conmigo y me ayudaron a seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

1 CAPÍTULO I 1
1.1 TEMA 1
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN. 1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL. 1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 1
1.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN ACTUAL. 1
1.4 HIPÓTESIS 3
1.5 ENSAMBLAJE AUTOMOTRIZ. 3
1.5.1 PROCESO DE ENSAMBLAJE EN CIAUTO. 4
1.5.2 BRAZOS ROBÓTICOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ. 8
1.6 MANIPULADORES DE CARGA. 9
2 CAPÍTULO II 11
2.1 DISEÑO BASADO EN LA CALIDAD 11
2.1.1 OBTENCIÓN DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS 11
2.1.2 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD). 11
2.1.2.1 Voz del Usuario 11
2.1.2.2 Voz del Ingeniero 12
2.1.3 ANÁLISIS DE LA MATRIZ QFD. 12
2.1.4 FORMULACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 14
2.2 DISEÑO CONCEPTUAL. 15
2.2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL 15
2.2.2 DEFINICIÓN DE MÓDULOS FUNCIONALES 20
2.2.3 SOLUCIONES PARA LOS MÓDULOS FUNCIONALES 20
2.2.3.1 Soluciones para el Módulo Estructural. 21
2.2.3.2 Soluciones para el Módulo Control. 21

2.2.3.2.1 Soluciones para el Módulo 4 – Interacción Máquina – Operador. 21
2.2.3.2.2 Soluciones para el Módulo 5 – Procesamiento de Imagen. 22
2.2.3.2.3 Soluciones para el Módulo 6 – Control del Sistema. 23
2.2.3.3 Soluciones para el Módulo Automatización. 24
2.2.4 MATRIZ MORFOLÓGICA. 25
2.3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS. 25
2.3.1 ANÁLISIS DE RESIDUOS PONDERADOS 26
2.3.1.1 Cámaras 28
2.3.1.1.1 Selección de Cámara. 28
2.3.1.2 Sensores 29
2.3.1.2.1 Selección de Sensores. 30
2.3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA. 30
3 CAPÍTULO III 32
3.1 DISEÑO MECÁNICO. 32
3.1.1 MODELO PRELIMINAR DE LA MÁQUINA. 32
3.1.2 DISEÑO DE MECANISMO DE GIRO EN X. 33
3.1.2.1 Cálculo del Mecanismo de Sujeción. 34
3.1.2.2 Cálculo de Brazo Soporte. 37
3.1.2.3 Cálculo de Viga Soporte. 39
3.1.2.3.1 Deflexión por Esfuerzo Flector. 39
3.1.2.3.2 Deflexión por Esfuerzo de Torsión. 40
3.1.2.4 Cálculo de Eje de Giro. 42
3.1.2.5 Selección de Rodamientos. 53
3.1.2.6 Cálculo de Tornillo de Potencia 56
3.1.3 DISEÑO DE MECANISMO DE GIRO EN Y. 59
3.1.3.1 Cálculo de Columna Soporte. 60

3.1.3.2 Cálculo de Estructura Soporte. 65
3.1.3.3 Cálculo de Eje de Giro. 68
3.1.3.4 Selección de Rodamiento 2. 70
3.1.4 DIMENSIONAMIENTO DE MOTORES. 70
3.1.4.1 Motor para Sistema de Sujeción. 70
3.1.4.2 Motor para Giros de Posicionamiento. 71
3.2 DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO. 73
3.2.1 SENSORES. 73
3.2.2 BOTONERA. 75
3.2.3 DRIVERS. 75
3.2.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN. 75
3.2.4.1 Protecciones Eléctricas 76
3.2.5 DISEÑO DE PLACA ELECTRÓNICA 77
3.2.6 SELECCIÓN DE PLC 77
3.2.7 Interfaz de Operación del HMI. 78
3.2.8 CONEXIONES 79
3.3 ALGORITMOS DE CONTROL. 80
3.3.1 ALGORITMO GENERAL DE CONTROL. 80
3.3.2 PROCESAMIENTO DE IMAGEN. 81
3.3.3 POSICIONAMIENTO INICIAL DE MÁQUINA. 82
3.3.4 POSICIONAMIENTO DE COMPARTIMENTO. 84
3.3.5 LIBERACIÓN DE COMPARTIMENTO. 85
4 CAPITULO IV 86
4.1 CONSTRUCCIÓN. 86
4.1.1 CONSTRUCCIÓN DE MECANISMO DE GIRO 1. 86
4.1.2 CONSTRUCCIÓN DE MECANISMO DE GIRO 2. 88

4.1.3 CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA SUSPENDIDA. 90
4.1.4 CONSTRUCCIÓN DE EXTENSIÓN TORRE. 90
4.1.5 CONSTRUCCIÓN TORRE. 91
4.1.6 CONSTRUCCIÓN DE SOPORTE KBK. 92
4.2 PRUEBAS Y RESULTADOS. 93
4.2.1 PRUEBAS DE ALGORITMO DE VISIÓN. 93
4.2.1.1 Resultados 95
4.2.2 PRUEBAS DE OPERACIÓN. 95
4.2.2.1 Resultados 97
CONCLUSIONES 98
RECOMENDACIONES 99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de proceso para ubicación de compartimento de motor. 2
Figura 1.2 Diagrama de Proceso Soldadura. 5
Figura 1.3 Diagrama de Proceso Pintura. 6
Figura 1.4 Diagrama de Proceso Ensamblaje. 7
Figura 1.5 Manipulador de Carga. 9
Figura 1.6 Propuesta de Mecanismo. 10
Figura 2.1 Nivel 0 - Estructura Funcional 16
Figura 2.2 Nivel 1 - Módulos Funcionales 16
Figura 2.3 Nivel 1 – Módulo 1. 17
Figura 2.4 Nivel 1 - Módulo 2 17
Figura 2.5 Nivel 1 - Módulo 3. 18
Figura 2.6 Nivel 2 – Módulo 4. 18
Figura 2.7 Nivel 2 – Módulo 5. 19
Figura 2.8 Nivel 2 – Módulo 6. 19
Figura 2.9 HMI COOLMAY. 21
Figura 2.10 Pantalla Touch Flexem. 21
Figura 2.11 Orange Pi. 22
Figura 2.12 Beaglebone Black Industrial. 22
Figura 2.13 Raspberry Pi 3 Modelo B 22
Figura 2.14 PLC Controllino MAXI. 23
Figura 2.15 PLC M-DUINO. 23
Figura 2.16 Motor a pasos NEMA 34. 24
Figura 2.17 Servomotores Industriales. 24
Figura 2.18 Cámara de alta velocidad. 29
Figura 2.19 Cámaras de vigilancia. 29

Figura 2.20 Cámara Lineal 29
Figura 2.21 Fines de Carrera. 30
Figura 2.22 Sensor de proximidad inductivo. 30
Figura 3.1 Modelo Preliminar. 33
Figura 3.2 Mecanismo de giro en X. 34
Figura 3.3 Mecanismo de Sujeción. 35
Figura 3.4 Diagrama de Cuerpo Libre de Viga Simplemente Apoyada. 35
Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre del Brazo Soporte. 38
Figura 3.6 Diagrama de Cuerpo Libre Viga Soporte sometida a Flexión. 39
Figura 3.7 Diagrama de Cuerpo Libre Viga Soporte sometida a Torsión. 40
Figura 3.8 Diagrama de Cuerpo Libre Eje. 43
Figura 3.9 Posición de Chumaceras 43
Figura 3.10 Diagrama de Cortantes, con carga. 44
Figura 3.11 Diagrama de Momentos, con carga. 45
Figura 3.12 Diagrama de Cortantes, sin carga. 45
Figura 3.13 Diagrama de Momentos, sin carga. 46
Figura 3.14 Sensibilidad a la muesca. 50
Figura 3.15 Factor de Concentración de Esfuerzos, torsión. 51
Figura 3.16 Factor de Concentración de Esfuercos, flexión. 51
Figura 3.17 Eje Horizontal. 51
Figura 3.18 Tornillo de Potencia. 56
Figura 3.19 Coeficientes de fricción estática y cinética. 57
Figura 3.20 Mecanismo de Giro en Y 59
Figura 3.21 Diagrama de Cuerpo Libre. 60
Figura 3.22 Vista lateral de la estructura soporte 65
Figura 3.23 Sección transversal de estructura soporte. 66

Figura 3.24 Eje Vertical. 68
Figura 3.25 Diagrama General de Conexión. 73
Figura 3.26 a) Movimiento de Estructura de Giro 1. b) Movimiento de Estructura de Giro 2. 74
Figura 3.27 Ubicación de sensores en el sistema. 74
Figura 3.28 Circuito para Driver A4988. 77
Figura 3.29 Pantalla Principal. 78
Figura 3.30 Ventana de Calibración. 79
Figura 3.31 Algoritmo General de Control. 80
Figura 3.32 Algoritmo de procesamiento de Imagen. 82
Figura 3.33 Algoritmo de Posicionamiento Inicial. 83
Figura 3.34 Procesos predefinidos de Posicionamiento Inicial. 84
Figura 3.35 Algoritmo de Posicionamiento de Compartimento. 85
Figura 3.36 Algoritmo de liberación de compartimento. 85
Figura 4.1 Diagrama de proceso de construcción de Mecanismo de Giro 1. 87
Figura 4.2 Diagrama de proceso de construcción de Mecanismo de Giro 2. 89
Figura 4.3 Diagrama de proceso de construcción de Estructura Suspendida. 90
Figura 4.4 Diagrama de proceso de construcción de Extension Torre. 91
Figura 4.5 Diagrama de proceso de construcción de Torre. 92
Figura 4.6 Diagrama de proceso de construcción de Soporte KBK. 93
Figura 4.7 Carta de Control de Tratamiendo de Imagen para Imágenes que contengan un Compartiemento de Motor. 94
Figura 4.8 Carta de Control de Tratamiendo de Imagen para Imágenes que contengan dos Compartiemento de Motor. 95
Figura 4.9 Carta de Control de Tiempo de Giro de Volteo. 97
Figura 4.10 Carta de Control de Tiempo de Giro de Posicionamiento. 97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Escala de Prioridad de Requerimientos 12
Tabla 2.2 Escala de Evaluación Comparativa. 13
Tabla 2.3 Niveles de Correlación 13
Tabla 2.4 Escala de relación entre requerimientos 13
Tabla 2.5 Escala para Evaluación Competitiva Técnica. 14
Tabla 2.6 Especificaciones Técnicas. 15
Tabla 2.7 Descripción de materiales Nivel 1. 18
Tabla 2.8 Opciónes para Interfaz Hombre Máquina. 21
Tabla 2.9 Opciones para Computador 22
Tabla 2.10 Opciones para PLC. 23
Tabla 2.11 Opciones para Motores. 24
Tabla 2.12 Matriz Morfológica. 25
Tabla 2.13 Ponderación de Criterios. 27
Tabla 2.14 Análisis del criterio Costo. 27
Tabla 2.15 Análisis del criterio Durabilidad. 27
Tabla 2.16 Análisis del criterio Utilidad. 27
Tabla 2.17 Análisis del criterio Conectividad. 27
Tabla 2.18 Análisis del criterio Control. 28
Tabla 2.19 Conclusiones. 28
Tabla 2.20 Opciones para Cámara. 29
Tabla 3.1 Valores de Fuerzas actuantes. 44
Tabla 3.2 Parámetros en el factor de la condición superficial. 49
Tabla 3.3 Valores de Fuerzas. 61
Tabla 3.4 Datos para hallar centro de masa [cm]. 66
Tabla 3.5 Valores de Fuerzas y Distancias actuantes 67

Tabla 3.6 Esfuerzo normal y flector para eje de giro 2. 69
Tabla 3.7 Valores de esfuerzos alternate y medio. 69
Tabla 3.8 Factores modificadores. 69
Tabla 3.9 Disposición de Sensores. 74
Tabla 3.10 Descripción de Botones del Sistema. 75
Tabla 3.11 Consumo eléctrico de elementos. 76
Tabla 3.12 Características de Fuentes de Alimentación. 76
Tabla 4.1 Datos de análisis de Imagenes. 94
Tabla 4.2 Datos de Tiempo de Giro de Volteo (Giro al rededor de X). 96
Tabla 4.3 Datos de Tiempo de Giro de Posicionamiento (Giro al rededor de Y). 96

ABREVIATURAS

GPIO: Entradas/Salidas de propósito general por sus siglas en inglés (General Proposit Input Output).

PPR: Pulsos por Revolucion.

PRM: Revoluciones por Minuto.

SCADA: Supervisión, Control y Adquisición de Datos por sus siglas en inglés (Supervisory Control And Data Adquisition).

QFD: Despliegue de la Función de Calidad por sus siglas en inglés (Quality Function Developement).

PWM: Modulación por ancho de pulso por sus siglas en inglés (Pusle Width Modulation)

PLC: Controlador Lógico Programable por sus siglas en inglés (Programmable Logic Controller).

FPS: Fotograma por segundo.

AWG: American Wire Gauge.

RESUMEN

Con el avance de la tecnología y el crecimiento de las industrias cada vez es mayor la necesidad de mejorar las condiciones en las cuales se realizan cada uno de los procesos productivos dentro del ámbito industrial.

Este texto describe el diseño y construcción de un sistema de volteo para compartimento de motor, para la empresa Ciudad del Auto CIAUTO CIA. LTDA., dedicada al ensamblaje de vehículos de la marca Great Wall. El sistema permite colocar el compartimento de motor, parte estructural del vehículo en el cual se coloca el motor del automóvil, sobre un JIG de soldadura en la línea de producción.

El sistema mediante una cámara y un algoritmo de visión artificial, en el cual se encuentran implementados filtros como difuminado, dilatación, erosión entre otros más, es capaz de identificar el número de compartimentos que se encuentran dicho pallet e indicar a la máquina en qué posición debe tomar el próximo compartimento y qué movimientos se deben realizar para alcanzar la posición en la cual debe colocarse el compartimento en la línea de soldadura.

Para que todo este proceso se realice, el diseño estructural de la máquina parte de consideraciones dimensionales, como por ejemplo el espacio o volumen de trabajo en el cual prestará servicio la máquina, y consideraciones de rigidez y estabilidad con la finalidad de asegurar la vida útil del sistema y la seguridad de los operadores al utilizarlo.

Al final, el operador para manejar el sistema cuenta con dos interfaces, una pantalla y una botonera de mando. Desde la pantalla se es capaz de mover las diferentes articulaciones de la máquina y calibrar la posición inicial del sistema, además de permitir iniciar el proceso de reconocimiento de imagen. Con la botonera de mando se puede iniciar dos procesos: el de sujeción del compartimento y la liberación del mismo.

Para operar la máquina el operador sigue el proceso descrito a continuación:

Una vez haya sido colocado el pallet con compartimentos de motor en la zona de alimentación de la línea, mediante un montacargas, el operador por medio del HMI inicia el reconocimiento y la máquina se posiciona para tomar el próximo compartimento de motor.

Una vez la máquina se ha posicionado el operador la ubica dentro del compartimento de motor y mediante la botonera de mando inicia la sujeción.

Con el compartimento sujeto se eleva este con la ayuda de un tecle, cuando este llegue a una altura pre establecida los giros de posicionamiento automáticamente inician y es posible el trasladarlo hasta el JIG de soldadura.

Cuando el compartimento esté en su ubicación final, con la botonera de mando se libera la sujeción y el proceso se inicia nuevamente.

ABSTRACT

With the advancement of technology and the growth of industries, there is an increasing need to improve the conditions in which each of the production processes is carried out within the industrial sphere.

This text describes the design and construction of a tipping system for engine compartment, for the Ciudad del Auto CIAUTO CIA company. LTDA., Dedicated to the assembly of vehicles of the Great Wall brand. The system allows to place the engine compartment, structural part of the vehicle in which the automobile engine is placed, on a welding JIG in the production line.

The system by means of a camera and an artificial vision algorithm, in which filters such as blurring, dilation, erosion, among others, are implemented, is able to identify the number of compartments that are found on said pallet and indicate to the machine in which position You must take the next compartment and what movements must be made to reach the position in which the compartment should be placed in the welding line.

For this whole process to be carried out, the structural design of the machine starts from dimensional considerations, such as the space or work volume in which the machine will serve, and considerations of rigidity and stability in order to ensure the useful life of the system and the safety of the operators when using it.

In the end, the operator to operate the system has two interfaces, a screen and a control pendant. From the screen it is possible to move the different joints of the machine and calibrate the initial position of the system, as well as allowing to start the process of image recognition. With the control keypad you can start two processes: the subjection of the compartment and the release of the same.

To operate the machine the operator follows the process described below:

Once the pallet with motor compartments has been placed in the line feeding zone, by means of a forklift, the operator starts the reconnaissance by means of the HMI and the machine is positioned to take the next engine compartment.

Once the machine has been positioned, the operator places it inside the engine compartment and starts the clamping by means of the control keypad.

With the subject compartment this is raised with the help of a key, when it reaches a pre-established height the positioning turns automatically start and it is possible to move it to the welding JIG.

When the compartment is in its final location, with the control keypad the clamping is released and the process starts again.

INTRODUCCIÓN

El Ecuador dentro del esquema del Cambio de la Matriz Productiva, junto con la CINAE (Cámara de la Industria Automotriz del Ecuador) busca generar una propuesta integral del sector automotriz, para fortalecer inversiones, generar empleo e incorporar tecnología.

En el Ecuador la industria de ensamblaje automotriz se encuentra en vías de desarrollo por lo que los procesos en las diferentes ensambladoras se encuentran con un bajo grado de automatización utilizando equipos como tecles, montacargas y sistemas neumáticos de sujeción

La industria automotriz al igual que muchas otras, dentro de sus procesos estable al manejo de cargas, como un factor crucial al momento del desarrollo de sus actividades productivas; una carga es considerada como: cualquier objeto con un peso superior a los 5kg. Para trabajar con elementos pesados y con la ayuda del desarrollo tecnológico existe una gran diversidad de dispositivos, mecanismo, máquinas y sistemas auxiliares para ayudar en el manejo de componentes pesados. Seleccionar el más óptimo depende principalmente de los niveles de producción, tipo de carga y proceso dentro del cual el mecanismo brindará asistencia.

En este contexto y con la idea de aportar en el ámbito tecnológico al desarrollo automotriz en la Provincia de Tungurahua, surgió la idea de diseñar y construir un sistema de volteo para compartimento de motor, para la empresa Ciudad del Auto CIAUTO CIA. LTDA que tiene como finalidad automatizar el proceso, minimizar el esfuerzo físico de los operadores que trabajan en esta estación y mitigar el riesgo de lesiones.

En el desarrollo del presente trabajo se detalla ampliamente el diseño y construcción del sistema antes mencionado:

En el Capítulo I se describe los objetivos del proyecto y explica alguno de los diferentes métodos disponibles para el manejo de cargas, desde manipuladores de carga mecánicos hasta los más sofisticados brazos robóticos.

En el Capítulo II se presenta el análisis de QFD para desarrollar un diseño basado en la calidad, obteniéndose así los requerimientos técnicos en base a las necesidades del cliente, voz del usuario, y la voz del ingeniero. Adicional a esto se muestra el diseño

conceptual, que describe la máquina mediante sus diferentes módulos funcionales y para finalizar por medio de una matriz morfológica y el análisis de residuos ponderados se selecciona la mejor alternativa de diseño de cada uno de los componentes que integran la máquina.

En el Capítulo III se explica el diseño mecánico, electrónico, eléctrico e informático para obtener un correcto funcionamiento del sistema de volteo para compartimento de motor. Dentro del diseño mecánico consta el diseño del chasis o estructura de soporte, así como las diferentes partes de los mecanismos móviles que permiten el funcionamiento de la máquina. En el diseño eléctrico y electrónico se incluye la selección de PLC, protecciones y conexiones de los elementos eléctricos, y el diseño informático se refiere principalmente a la interfaz gráfica y los algoritmos tanto de control como de visión artificial.

Finalmente, en el Capítulo IV se expone el proceso de construcción y las pruebas de funcionamiento del sistema con sus respectivos resultados. El propósito de las pruebas y el análisis de sus resultados es verificar que el proceso se encuentre controlado y opere dentro de límites establecidos por el diseñador, debido a que en todo proceso se encuentra un error al momento de su funcionamiento, el propósito del control es minimizar éste.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 TEMA.

“Diseño y construcción de un sistema de volteo para el compartimiento de motor para la línea de ensamblaje del vehículo modelo M4 para la empresa CIAUTO”

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

A continuación, se presentan los objetivos del presente proyecto de titulación.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y construir un sistema de volteo para el compartimento de motor para la línea de ensamblaje del vehículo modelo M4 para la empresa CIAUTO en la ciudad de Ambato.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Fundamentar la teoría referente al traslado de cargas de peso mediano en la industria de ensamblaje automotriz.
- Diseñar e implementar el sistema mecánico, eléctrico y electrónico.
- Realizar la programación del PLC para el control de la sujeción, volteo y posicionamiento del compartimiento de motor.
- Implementar un algoritmo de visión artificial para identificar si el compartimento requiere ser volteado o solo trasladado.
- Implementar una HMI que muestre el estado actual de la máquina, un reporte de la producción diaria y mensual efectuada, y permita operar el sistema.

1.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN ACTUAL.

La empresa ensambladora CIAUTO realiza el montaje de la mayor parte de componentes de los vehículos de forma manual, esto conlleva a tener riesgos latentes por fallo humano, a pesar de no ser frecuente, de llegar a suceder, causaría un impacto negativo a la empresa por los daños a componentes y posibles heridas que los operadores pudieran sufrir , adicional a esto se encuentra la posibilidad que los operadores desarrollen deformaciones en la columna vertebral, considerándose esto como una enfermedad laboral.

Mediante la implementación de un sistema de volteo para compartimento de motor los riesgos mencionados anteriormente se reducen, debido a que la máquina puede efectuar esta operación con la potencia necesaria para manipular con facilidad este elemento, adicionalmente se minimiza la probabilidad de que los operadores desarrollen algún tipo de enfermedad profesional por el esfuerzo físico realizado.

El sistema será capaz de analizar la posición de los compartimentos en la zona de almacenaje previo a su posicionamiento mediante una cámara y un sistema de reconocimiento de imágenes, el cual identificará de qué posición debe tomar el compartimento y en qué posición debe colocarlo. Su ubicación final en el JIG de soldadura estará controlada por sensores para determinar la posición del sistema de volteo en el riel de transporte y colocar el compartimento de motor en los pines guía del JIG de soldadura. El compartimento de motor tiene un peso de 50kg +/- 2kg.

El diseño e implementación de un sistema de volteo para compartimentos de motor, en función del análisis de posición de los compartimentos a través de una imagen permitirá automatizar el proceso en la empresa, al mismo tiempo minimiza el esfuerzo físico de los operadores que trabajan en esta estación y mitigar el riesgo de lesiones.

El proceso que actualmente se aplica en CIAUTO para la ubicación del compartimento de motor en el JIG de soldadura de la estación SM4-1 se muestra en la Figura 1.1.

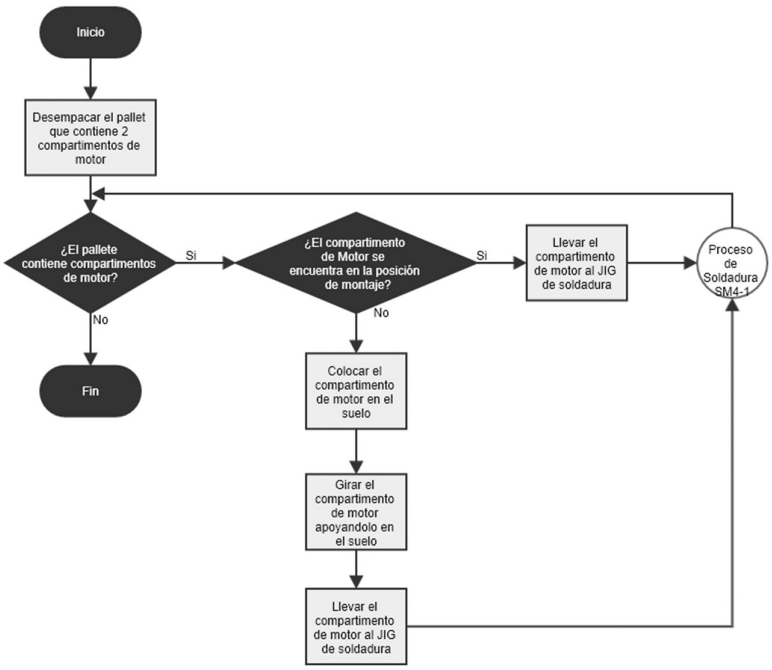


Figura 1.1 Diagrama de proceso para ubicación de compartimento de motor.

1.4 HIPÓTESIS

El sistema prototipo diseñado e implementado para la ubicación de compartimentos de motor para la empresa Ciudad del Auto CIAUTO CIA. LTDA., minimiza el esfuerzo físico realizado por el operador de la estación SM4-1 al realizar la tarea de posicionamiento del componente mencionado anteriormente, conjuntamente disminuye potenciales riesgos de lesiones y afectaciones materiales.

1.5 ENSAMBLAJE AUTOMOTRIZ.

La industria automotriz a nivel mundial se la puede considerar como una de las más avanzadas a nivel tecnológico debido a que día a día se realizan mejoras en los diseños actuales y se lanzan a mercado nuevos modelos de vehículos. El proceso de ensamblaje automotriz parte con la elaboración de planchas de acero o aluminio que posteriormente mediante la utilización de prensas hidráulicas y diversos moldes formarán las diferentes partes del vehículo, como se menciona en [1], posteriormente se traslada estas partes a la planta de ensamblaje, misma que generalmente se encuentra compuesta por tres partes o etapas: soldadura, pintura y ensamblaje como se indica en [2]. La línea de soldadura se encarga de unir las partes de la carrocería mediante suelda de punto [3], este tipo de soldadura une dos laminas en un punto debido al paso de corriente por dos electrodos situados uno frente al otro, las soldadoras de punto se las puede instalar en brazos robóticos o ser utilizadas por operadores, esto depende del volumen de producción que maneje la empresa, si este es alto, por ejemplo 250 carrocerías al día, esa fábrica necesariamente empleará una línea completamente automatizada de soldadura porque los robots son capaces de realizar tareas repetitivas a una velocidad mucho mayor a los humanos. Una vez soldada la carrocería, esta pasa a una planta de pintura, en la cual se le aplican tratamientos anticorrosión para posteriormente ser recubierta por pintura para su acabado final, de manera similar a la línea de soldadura en esta planta también se puede utilizar tanto brazos robóticos como personal para realizar el trabajo. Como etapa final se encuentra el ensamblado, aquí los fabricantes emplean operadores por la gran cantidad de componentes que deben ser colocados en un espacio muy reducido, estos componentes vienen a ser, la tapicería, asientos, tablero, motor, sistema de suspensión, etc., en si los componentes que darán vida al vehículo.

En el Ecuador la industria de ensamblaje automotriz se encuentra en vías de desarrollo por lo que los procesos en las diferentes ensambladoras se encuentran con un bajo grado de automatización utilizando equipos como tecles, montacargas y sistemas neumáticos de sujeción. Las fábricas de CIAUTO y GENERAL MOTORS OBB, [4], actualmente ensamblan vehículos en el país, con la mayor parte de sus procesos realizados por operadores, mientras que para el año 2017 el GRUPO ELJURI, firmó un contrato con Volkswagen para realizar el ensamblaje de la camioneta Amarok, los procesos de la línea de soldadura serán robotizados, la producción no será únicamente para el mercado ecuatoriano, lo que significa que el nivel de producción será muy alto [5].

1.5.1 PROCESO DE ENSAMBLAJE EN CIAUTO.

La empresa ensambladora CIAUTO fabrica sus vehículos para satisfacer las necesidades del mercado ecuatoriano, pese a que cuenta con planes para incursionar en el mercado colombiano y venezolano, como se menciona en [6], es decir que sus vehículos por lo pronto no se exportan, de modo que su producción es reducida a comparación de empresas extranjeras.

Al ser pocas las empresas ensambladoras automotrices en el país y ser este un sector altamente costoso en cuanto a automatización no se encuentran trabajos de investigación relacionados directamente al ensamblaje automotriz, además que todas las tendencias tecnológicas dirigen a un mismo punto, emplear brazos robóticos, claro está que para realizar una inversión en este tipo de automatización es primordial tomar en cuenta los costos que se ven implicados, este tipo de robots se los encuentra en un precio alrededor de $20,000.00.

La planta ensambladora cuenta con una serie de grúas aéreas, sistemas electrónicos y electro neumáticos para el posicionamiento y sujeción de los diferentes componentes a lo largo de las diferentes líneas de producción: soldadura, pintura y ensamblaje de interior.

A lo largo de la línea de soldadura el esqueleto de la carrocería va tomando forma, para esto diferentes partes como: compartimento de motor, piso, cajuela, laterales, techo, etc., son unidas mediante soldadura de punto, otras partes como: puertas y cofre son sujetadas con pernos, el resultado final es una cabina lista para pasar a la planta de pintura. Una característica del modelo M4 de GreatWall es que este vehículo

no cuenta con un chasis, todo el auto se sustenta en la cabina. Todo el trabajo de posicionamiento de partes y soldadura es realizado por operadores, es decir de forma manual, con la ayuda de grúas o tecles suspendidos para elevar los componentes más pesados y transportarlos de estación en estación, el diagrama de procesos se muestra en la Figura 1.2.

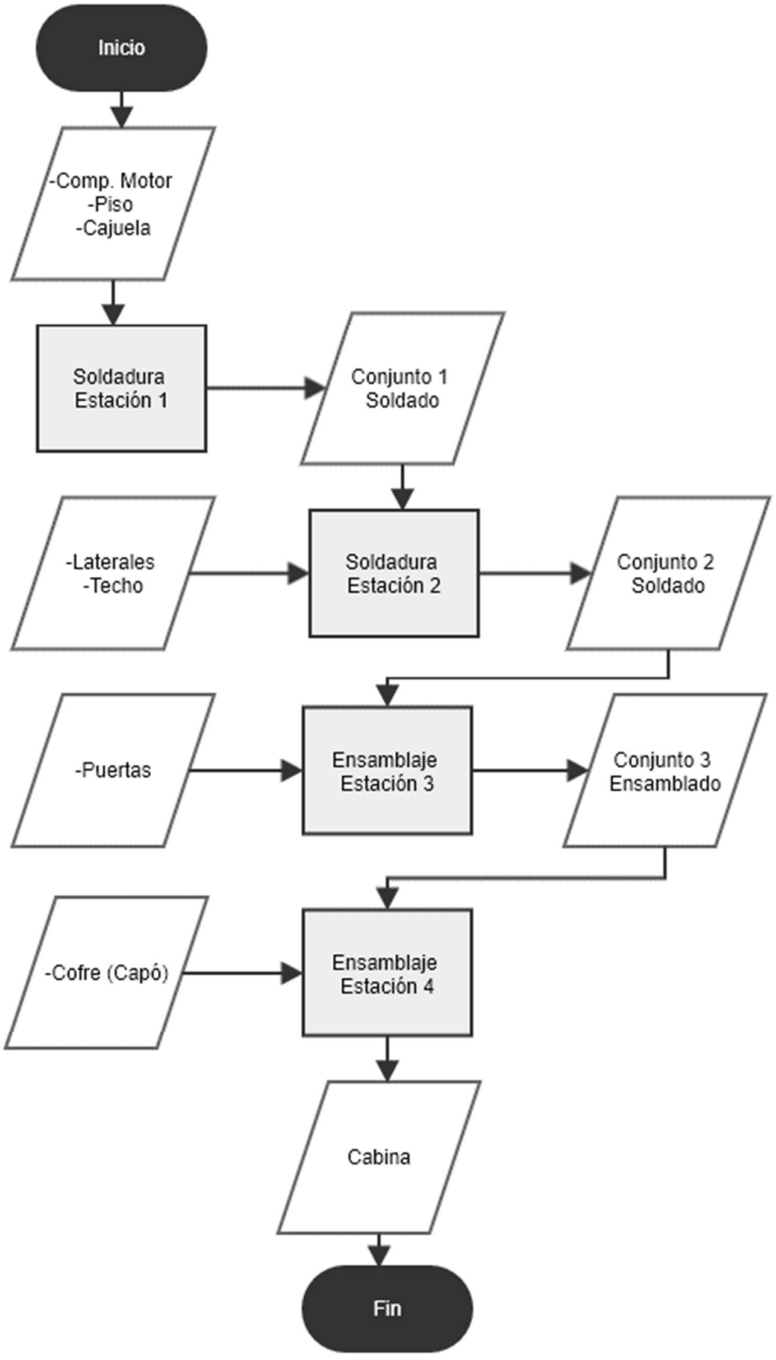


Figura 1.2 Diagrama de Proceso Soldadura.

En la planta de pintura la cabina pasa por una serie de piscinas que aplican diferentes tratamientos para protegerla de la corrosión y preparándola para el trabajo de pintura, que finaliza con un aspecto reluciente y de alta calidad, el diagrama de procesos se muestra en la Figura 1.3.

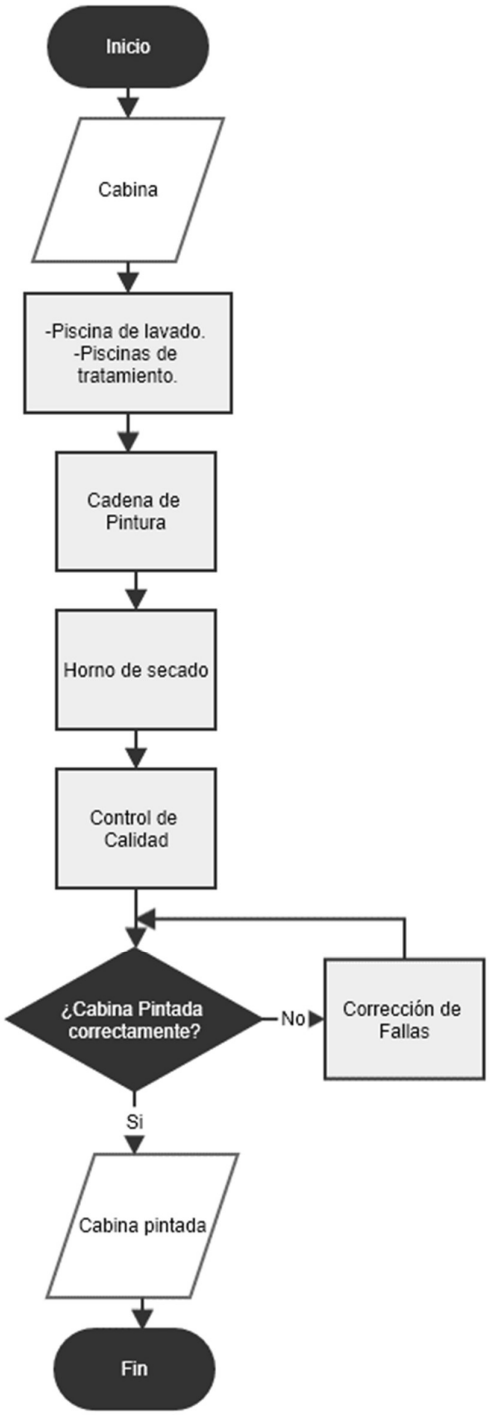


Figura 1.3 Diagrama de Proceso Pintura.

Finalmente, el ensamblaje de interior se coloca en la cabina todos los componentes que harán de esta un vehículo: motor, sistema de frenos, vidrios, volante, tablero, llantas, sistema de suspensión, etc., todo este proceso es realizado de manera manual, claro con la ayuda de elevadores y tecles para los componentes más pesados, por último se colocan líquidos de freno, refrigerante, limpia parabrisas, se codifican las llaves y se enciende por primera vez el automotor, el diagrama de procesos se muestra en la Figura 1.4.

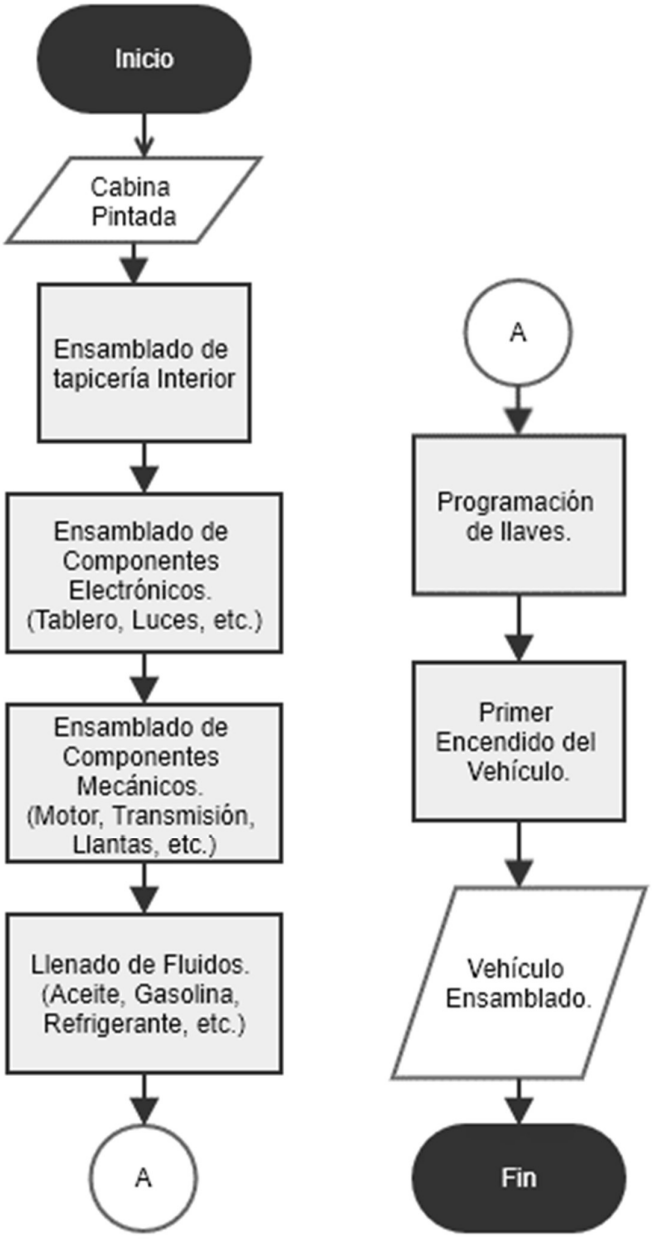


Figura 1.4 Diagrama de Proceso Ensamblaje.

1.5.2 BRAZOS ROBÓTICOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.

A nivel mundial se encuentra direccionada hacia la automatización mediante brazos robóticos industriales, los cuales brindan una gran precisión en sus acciones, un alto ritmo de producción a costa de un elevado costo de implementación y mantenimiento, mismo que debe ser realizado por personal calificado, de este modo es posible automatizar en su totalidad una línea de producción, como las líneas de soldadura o líneas de pintura, por ejemplo. La fábrica de AUDI en San José Chiapa, México, empezó su producción en el año 2016, su construcción inició en el año 2013 en un área de 220 hectáreas y se encuentra automatizada a un nivel del 80% con 670 brazos robóticos en la planta de hojalatería y 157 en la planta de pintura teniendo un nivel del 46% de automatización [7].

Los brazos robóticos utilizados son de marca KUKA, una de las marcas más utilizadas en diversos procesos industriales, los procesos que son automatizados con brazos robóticos, por lo general son aquellos que tienen una gran demanda y su nivel de producción es elevado, con la automatización se aprovecha de mejor manera el tiempo de producción y se requiere menor personal, a pesar de que el poco personal requerido debe estar altamente capacitado para trabajar con este tipo de maquinaria.

Este tipo de robots son utilizados para las labores de posicionamiento de objetos, soldadura y manejo de objetos peligrosos, con su implementación las fábricas buscan también una mayor seguridad industrial para sus trabajadores de acuerdo al criterio de [8], quien adicionalmente menciona que los robots hasta la actualidad no poseen la capacidad de pensar por ellos mismos, para esto el personal humano es indispensable. En el computador central del brazo robótico se programa los movimientos y tiempos en lo que los va a realizar, claro que en niveles más altos de automatización se añaden, sensores y protocolos de comunicación para que todo el proceso pueda ser controlado y monitoread o mediante un sistema SCADA, en el cual intervienen PLC’s que actualmente son implementados en un sinnúmero de aplicaciones industriales como se explica en [9].

Con el avance de la tecnología existen empresas como TESLA MOTORS que tienen planeado automatizar completamente sus plantas de ensamblaje de automotores, Elon Musk ha mencionado en The Washington Post [10] que en los próximos cinco años la tecnología habrá avanzado lo suficiente para lograr poseer una planta completamente automatizada, esto debido a que si se coloca operadores en la línea

de producción, la velocidad de esta debe ser ajustada a la velocidad humana, lo que limita el nivel de producción que desea el empresario estadounidense, hasta la fecha ha recibido un aproximado de 400 mil pedidos según [11].

1.6 MANIPULADORES DE CARGA.

Las máquinas más similares en aplicación a lo deseado son los manipuladores de carga, Figura 1.5, estas máquinas son capaces de manejar pesos desde 5 kg hasta 900 kg, con de accionamiento neumático, y como se puede observar son utilizadas para manipular armarios eléctricos.

En su base poseen ruedas, lo cual permite transportar tanto la máquina en vacío como cargada, cabe destacar que este tipo de máquina no posee la capacidad de rotar la carga 180 grados ya que por lo general no es necesario este trabajo, la sujeción a la carga es realizada mediante ventosas de succión, para lo cual es necesario disponer de porciones amplias y planas en la superficie del objeto a transportar, el costo aproximado de este tipo de máquinas es de $5000 dólares americanos, principalmente por la capacidad de carga y los mecanismos de accionamiento.

Figura 1.5 Manipulador de Carga.

Fuente: Direct Industry, [12]

La empresa Incomimex en su página web presenta una propuesta de diseño para un mecanismo de volteo para cajones eléctricos que posean un peso aproximado de 30 kg que se muestra en la Figura 1.6 a continuación, claro que el funcionamiento de esta propuesta es netamente manual.

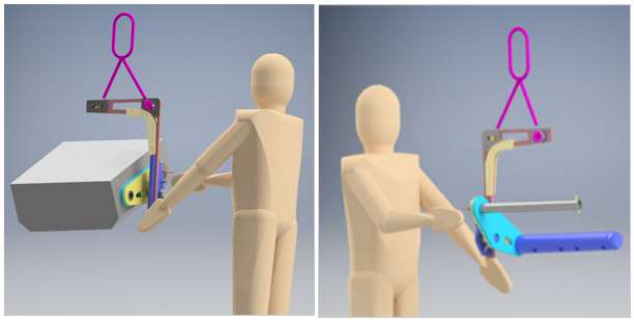


Figura 1.6 Propuesta de Mecanismo.

Fuente: Incomimex, [13]

En este sitio no detallan muy a fondo las características de esta máquina, pero al observar las imágenes se puede apreciar que esta debe ser accionada mediante elevadores de cadena o balancines, para que el operador no deba realizar un esfuerzo físico excesivo.

CAPÍTULO II

CASA DE LA CALIDAD

2.1 DISEÑO BASADO EN LA CALIDAD

La tendencia actual en el diseño de máquinas y componentes es brindar la mejor calidad al producto partiendo de requerimientos del cliente desde una etapa inicial, esto se logra mediante la ingeniería concurrente descrita por Carles Riba en [14].

2.1.1 OBTENCIÓN DE REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

El presente proyecto busca brindar ayuda al operador de la estación SM4-1 de la empresa Ciudad del Auto CIAUTO CIA. LTDA., en el proceso de ubicación de los compartimentos de motor en el JIG de soldadura de su estación de trabajo puesto que al momento esta tarea es realizada por dos operadores, el proceso se encuentra descrito en la sección 1.5.1.

2.1.2 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD).

Mediante el QFD se busca transformar los requerimientos del cliente en criterios técnicos que aseguren mayor calidad al diseño del sistema. El Anexo A.1 contiene la matriz QFD para el presente proyecto y de este modo lograr satisfacer todas las necesidades de la empresa CIAUTO, realizando una serie de comparaciones con otras empresas como GM OBB y TESLA Motors.

2.1.2.1 Voz del Usuario

Los requerimientos del usuario se enlistan a continuación:

- Bajo costo de inversión, no superior a USD $2500.
- Que posicione el compartimento de motor en el JIG de soldadura.
- Que existan repuestos en el mercado nacional.
- Que la estructura sea desmontable.
- Que se utilice la infraestructura de la empresa.
- Que su manejo sea semiautomático.
- Que la máquina sea compacta.
- Que el tiempo de operación sea rápido.
- Que se visualice el uso de la máquina / producción.
- Que sea seguro.
- Que sujete firmemente el compartimento de motor.

- Que se utilice el material disponible en la empresa.
- Que permita un mantenimiento fácil y sencillo.
- Que los componentes estén identificados (codificados).

2.1.2.2 Voz del Ingeniero

Para cumplir con los requerimientos del usuario, se establecen los siguientes criterios técnicos, mismos que se enlistan a continuación:

- Sistemas Industriales y Embebidos.
- Tiempo de Operación: 1 minuto.
- Carga: 50kg +/- 2kg.
- Implementar un sistema de agarre.
- Dimensiones del sistema.
- Diseño modular.
- Materiales:
    - Acero
    - Aluminio

2.1.3 ANÁLISIS DE LA MATRIZ QFD.

Mediante el QFD se analiza los requerimientos de la empresa CIAUTO a manera de cliente para el desarrollo de un sistema de volteo y posicionamiento de compartimentos de motor en la línea de soldadura, los requerimientos ubicados en la sección de “Voz del Usuario” de la matriz, cada uno se lo ha cuantificado según su prioridad o importancia en la escala que se presenta en la Tabla 2.1 a continuación.

Tabla 2.1 Escala de Prioridad de Requerimientos

Prioridad	
Muy Importante	5
Importante	4
Indiferente	3
Poco Importante	2
Nada Importante	1

La Evaluación Competitiva, se trata de una comparación con empresas competidoras con base en los requerimientos que posee la empresa y como se realiza el trabajo a optimizar en la actualidad, la evaluación se utiliza una escala misma que se indica en la Tabla 2.2 a continuación.

Tabla 2.2 Escala de Evaluación Comparativa.

Totalmente Satisfecho	5
Insatisfecho	1

Con la evaluación competitiva se evidencia que las empresas nacionales CIAUTO y GM OBB realizan su proceso de ubicación de componentes de manera similar, mientras que TESLA MOTORS posee este proceso automatizado.

Para lograr cumplir con los requerimientos del cliente es necesario establecer requerimientos técnicos, que en conjunto cumplirán con las expectativas de la empresa, esta sección se la denomina “Voz del Ingeniero”.

En la parte superior de la matriz QFD se encuentran las interrelaciones entre los requerimientos técnicos, aquí se analiza los posibles conflictos que se pueden generar entre requerimientos, los niveles de correlación se observan en la Tabla 2.3, esta sección indica que al momento de diseñar se debe prestar especial atención a estas especificaciones técnicas. Aquí se evidencia que se debe prestar particular atención al manejo de la carga.

Tabla 2.3 Niveles de Correlación

Niveles de Correlación	
Muy Positiva	⊗
Positiva	⊕
Negativa	△
Muy Negativa	◈

En la sección central se encuentra la matriz de relación entre requerimientos del cliente y requerimientos técnicos, allí se cuantifica la relación existente entre requerimientos, la escala utilizada se presenta en la Tabla 2.4 a continuación.

Tabla 2.4 Escala de relación entre requerimientos

Alta relación	5
Baja relación	1

La siguiente sección denominada “Cuántos” se trata de los objetivos del diseño, aquí se ubica una cuantificación de los requerimientos técnicos. Posteriormente es realizada una evaluación competitiva técnica, similar a la evaluación competitiva realizada anteriormente, pero ahora se analiza la capacidad técnica que poseen las

empresas de adoptar los requerimientos técnicos, dicha evaluación se la realiza con la escala indicada en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Escala para Evaluación Competitiva Técnica.

Eval. Competitiva Técnica	
Aptos	5
No Aptos	1

La evaluación indica que la empresa CIAUTO tiene la capacidad de adoptar los requerimientos técnicos planteados pues se trata de una empresa en vías de desarrollo, es decir que tienen la capacidad de expandir su producción e ir mejorando sus procesos de producción.

Finalmente, en la sección de Importancia Técnica se obtiene, como su nombre lo indica, la importancia que cada requerimiento posee, según la matriz de interrelación entre requerimientos del cliente y requerimientos técnicos.

Observando los resultados obtenidos en la incidencia, al momento de diseñar el sistema, los aspectos más críticos serían:

1. Mecanismo de Sujeción: Al diseñar y realizar una correcta sujeción del compartimento se asegura que el manejo del mismo a lo largo del proceso sea seguro y eficiente.
2. La Carga: Al tomar en cuenta la carga se diseñan los componentes estructurales para que la máquina sea robusta.
3. Materiales: Con una correcta selección de materiales se asegura el tiempo de vida útil que el sistema prestará funciones.

Los criterios a mejorar con respecto a la competencia son esencialmente la seguridad y el tiempo de operación en el proceso de posicionamiento de compartimento de motor. Para esto se debe prestar particular atención a la capacidad de carga del sistema, la carga es el factor que delimita la mayor parte del diseño de la máquina.

2.1.4 FORMULACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Posterior a una entrevista con el cliente se llegó a formular las especificaciones técnicas que el sistema debe poseer, se lo muestra a continuación en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Especificaciones Técnicas.

Empresa: Ciudad del Auto CIAUTO CIA. LTDA.		**PRODUCTO:** Sistema de Volteo para Compartimento de Motor		Fecha Inicial: 05/08/17 Última Revisión: 19/11/17
Diseñador: Andrés Sebastián Arteaga Cabezas.				Página 1/1
Especificaciones				
CONCEPTO	**FECHA**	**PROPONE**	**R/D**	**DESCRIPCIÓN**
Función	06/08/17	Cliente	R	Posicionar un promedio de 15 compartimentos de motor en el JIG de soldadura al día.
Dimensiones	06/08/17	Cliente	R	Recorrido vertical de 2,1 m.
		Cliente	R	Área de trabajo aproximada 2,4 m.
Energía	10/09/17	Cliente	R	Utilizar las redes de energía disponibles en la planta (220v - 2 fases, 220v - 3 fases, 380 - 3 fases), Aire comprimido.
Fuerzas	06/08/17	Cliente	R	Manipular compartimento de motor de aproximadamente 50kg (+/- 2kg).
Movimientos	06/08/17	Cliente	R	Los giros de posicionamiento debe realizarse en 10 segundos.
	11/09/17	Cliente	R	La apertura y cerradura del mecanismo de sujeción debe realizarse en 2 segundos.
Costos y Plazos	11/09/17	Cliente	R	Inversión no superior a $2500
	06/08/17	Universidad	R	Finalizar antes del mes de Julio

2.2 DISEÑO CONCEPTUAL.

En esta sección del documento se desarrollan y analizan diversas alternativas de solución basadas en los requerimientos técnicos y requerimientos del usuario analizados en la sección 2.1.2.

2.2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Como parte del análisis funcional es necesario definir la estructura funcional del sistema, esto se lo realiza mediante un diagrama de bloques utilizando la simbología

de la normativa alemana VDI 2222 explicado por Riba en [14], aquí mediante la representación del flujo de material energía y señales se identifican las funciones que el sistema desempeña.

El nivel 0 representa la función global del sistema propuesto, se observa en la Figura 2.1.

Figura 2.1 Nivel 0 - Estructura Funcional

Los módulos funcionales están ilustrados en la Figura 2.2, estos son aquellos que intervienen en la construcción del sistema de volteo de forma muy general y agrupado en módulos, mismos que se amplían en el nivel 1 del diagrama funcional.

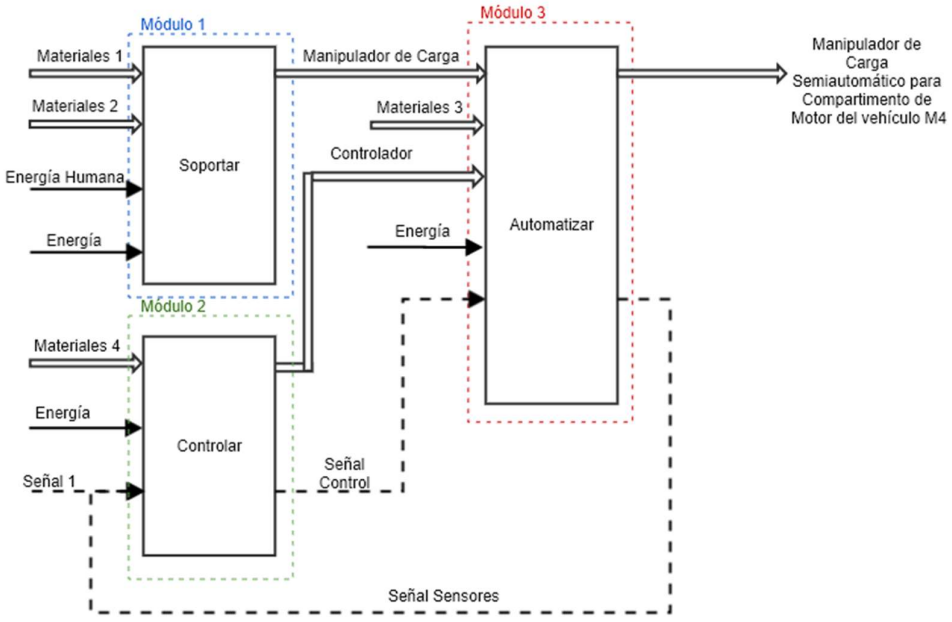


Figura 2.2 Nivel 1 - Módulos Funcionales

Para una mejor comprensión de los módulos funcionales se presentan las figuras: Figura 2.3, Figura 2.4, Figura 2.5. donde se amplía el contenido de los módulos estructural, control y automatización respectivamente.

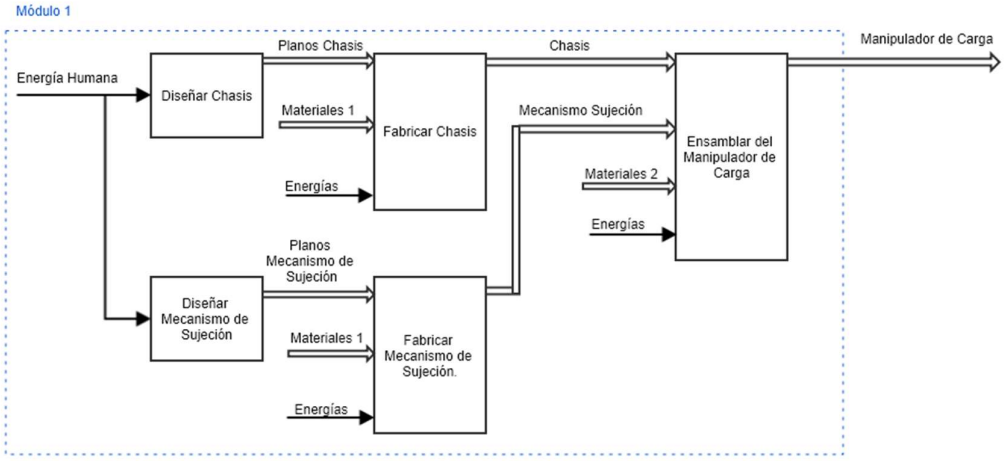


Figura 2.3 Nivel 1 – Módulo 1

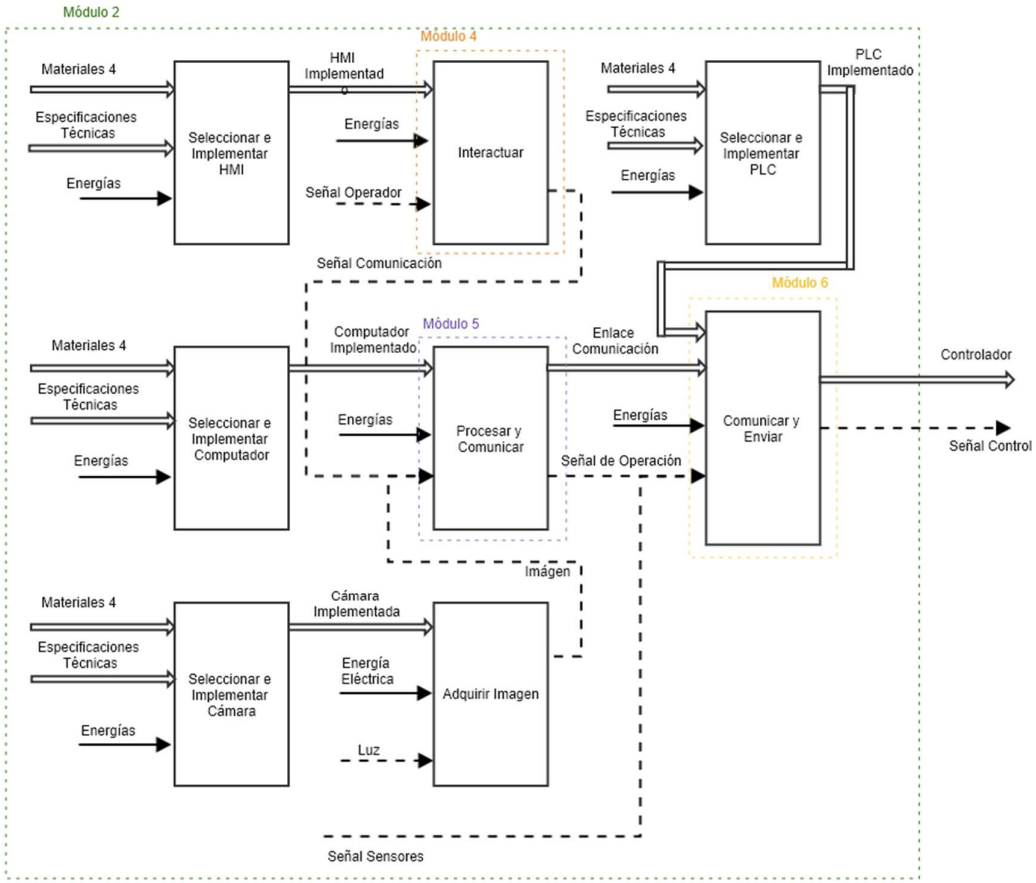


Figura 2.4 Nivel 1 - Módulo 2

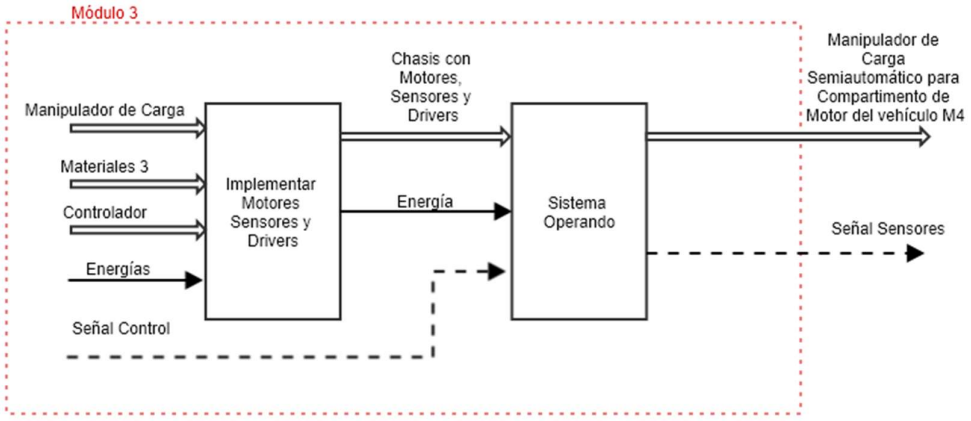


Figura 2.5 Nivel 1 - Módulo 3.

En la Tabla 2.7, se detallan los materiales utilizados en los diagramas del nivel 1 del diagrama funcional, en adición las energías utilizadas son Energía Eléctrica, Humana y Física, en caso de no especificarse.

Tabla 2.7 Descripción de materiales Nivel 1.

Materiales 1	Tubería estructural cuadrada, Suelda MIG, Pernos, Ejes de Acero.
Materiales 2	Pernos, Chumaceras, Rodamientos.
Materiales 3	Motores, Drivers, Sensores, Cables, Conectores Eléctricos.
Materiales 4	HMI, PLC, Computador, Cámara, Rúter, Cable Ethernet, Cables, Conectores Eléctricos, Fuente de alimentación.

Finalmente, el nivel 2 muestra en profundidad y de manera más detallada las funciones de programación y desarrollo del nivel 1 del diagrama funcional, estas se presentan en las Figuras 2.6 a 2.8 a continuación.

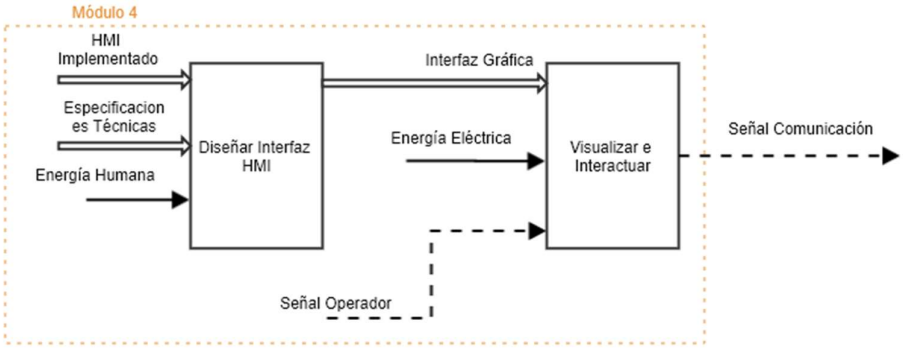


Figura 2.6 Nivel 2 – Módulo 4.

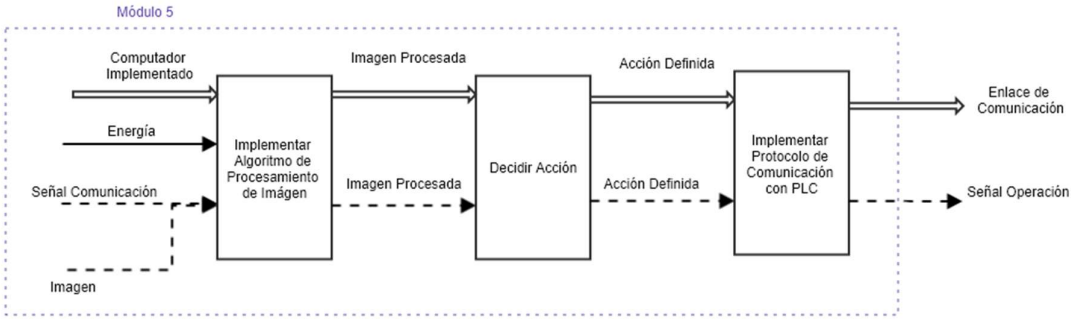


Figura 2.7 Nivel 2 – Módulo 5.

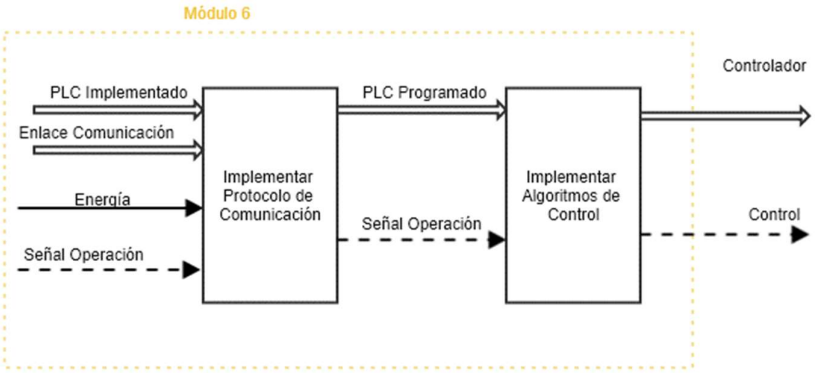


Figura 2.8 Nivel 2 – Módulo 6.

2.2.2 DEFINICIÓN DE MÓDULOS FUNCIONALES

Con los niveles de análisis funcional definidos se definen los siguientes módulos funcionales, mismos que permiten analizar cada una de las partes que intervienen en el sistema. Este análisis permite reducir costos, mejorar el mantenimiento, optimizar el uso de componentes, etc.

- **Módulo 1:** Módulo Estructural:
    - En este módulo la materia prima que ingresa se trata de elementos como: tubería estructural, suelda MIG o electrodos, tornillos, tuercas. Como energía interviene energía eléctrica para el funcionamiento de las diferentes máquinas herramientas y energía manual al manipular la materia prima y convertirlo en el chasis de la máquina.
- **Módulo 2:** Módulo Control:
    - En este módulo entran los componentes con los cuales el usuario interactúa con la máquina y viceversa y, adicionalmente realizan los cálculos y ejecutan los algoritmos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, dentro de este módulo se encuentran un módulo 4, 5 y 6, en estos tres últimos módulos intervienen los siguientes materiales: computador, PLC, HMI, conectores, etc., y en el nivel de programación los algoritmos de visión y control desarrollados.
- **Módulo 3:** Módulo Automatización:
    - En este módulo intervienen los efectores mediante los cuales el sistema interactúa con el medio material y cumple con su función, entre estos elementos consideran: motores, drivers, sensores, cables, conectores eléctricos, protecciones, etc.

2.2.3 SOLUCIONES PARA LOS MÓDULOS FUNCIONALES

En esta sección se definen las diferentes posibles soluciones para cada uno de los módulos funcionales, con esto se logra abarcar la mayor cantidad de posibles opciones de solución para cumplir los requerimientos del cliente y que el sistema sea funcional al 100%.

2.2.3.1 Soluciones para el Módulo Estructural.

La función del módulo estructural es soportar los componentes de la máquina y brindar la rigidez necesaria de modo que la solución para esto es una estructura mecánica, misma que se puede ajustar a los modelos de manipuladores de carga en el mercado.

2.2.3.2 Soluciones para el Módulo Control.

Para dar solución al módulo de control es necesario dar solución a los módulos 4, 5 y 6 que son los responsables de la interacción del operador con la máquina, el procesamiento de imagen y el control de la máquina respectivamente.

2.2.3.2.1 Soluciones para el Módulo 4 – Interacción Máquina – Operador.

La interacción del usuario con la máquina puede realizarse por diversos medios tales como lo que se presentan a continuación.

Tabla 2.8 Opciónes para Interfaz Hombre Máquina.

Elemento	Descripción
MT6070H Figura 2.9 HMI COOLMAY. Fuente: Coolmay, [15]	Pantalla HMI ofrece opciones de visualización y control de procesos mediante interfaz táctil programable mediante software de coolmay.
Flexem F007 Figura 2.10 Pantalla Touch Flexem. Fuente: Flexem, [16]	Pantalla táctil capacitiva compatible con diversos sistemas operativos, múltiples Interfaces de conexión VGA, USB, Ethernet.

2.2.3.2.2 Soluciones para el Módulo 5 – Procesamiento de Imagen.

El procesamiento de imagen debe ser realizado por un computador, para esto existen diferentes opciones tales como las presentadas en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Opciones para Computador

Elemento	Descripción	Características
Orange Pi Figura 2.11 Orange Pi. Fuente: OrangePI [17]	Es una plataforma computacional open-source con la capacidad de operar con diversas distribuciones Linux, enfocada al desarrollo tecnológico.	Procesador H2 Quad-core Cortex-A7 H.265/HEVC 1080P. Precio: USD $16. Periféricos: Rj45, MIC, USB.
Beaglebone Black Industrial Figura 2.12 Beaglebone Black Industrial. Fuente: element14, [18]	Es una plataforma computacional open-source de bajo costo, que trabaja con sistema operativo Linux Debian.	Procesador AM3358BZCZA100. Bajo costo USD $64.47. Sistema operativo Linux Debian. Periféricos: USB, mini-USB, micro-HDMI, microSD, 10/100 Ethernet RJ-45. Alimentación: fuente externa de 5 V. Es una tarjeta con hardware y software abierto.
Raspberry PI Figura 2.13 Raspberry Pi 3 Modelo B Fuente: RS Components, [19]	Es una plataforma computacional de bajo costo desarrollada por la Fundación Raspberry Pi en el Reino Unido, trabaja con sistema operativo Linux	Procesador ARM Cortex-A53. Bajo costo USD $ 40.92. Sistema operativo Linux Raspbian Periféricos: USB, HDMI, microSD, 10/100 Ethernet RJ45, RCA. Alimentación: fuente externa de 5.1 V a 2.5 A.

2.2.3.2.3 Soluciones para el Módulo 6 – Control del Sistema.

Al hablar de controladores en la industria, se hace referencia a los PLC's, en el mercado existe una amplia gama de estos debido a las características que se necesiten de estos, se presentan algunas alternativas en la

Tabla 2.10 Opciones para PLC.

Elemento	Descripción
Controllino MAXI Figura 2.14 PLC Controllino MAXI. Fuente: Controllino, [20]	Microcontrolador: ATmega2560 Velocidad del reloj: 16 MHz RTC Conector de Ethernet Interfaz serial 2x 1x interfaz RS485 1x interfaz I2C 1x interfaz SPI Corriente de entrada máx. 20A Salidas de relés 10x - 230V / 6A 12x entradas analógicas / digitales 12 salidas digitales: 2 A a 12 V o 24 V
PLC M-DUINO Figura 2.15 PLC M-DUINO. Fuente: Industrial Shields, [21]	PLC basado en Arduino (Open Source Hardware) está especialmente diseñado para su uso en un entorno profesional. Dispone de 21 E/S, también dispone de diferentes sistemas de comunicación lo que le ofrece una gran flexibilidad y control. Ofrece la posibilidad de expandirse con 127 módulos mediante el sistema I2C, esto implica que puede gobernar hasta 6604 E/S en modo maestro esclavo, además de módulos adicionales de sensores, etc.

2.2.3.3 Soluciones para el Módulo Automatización.

Uno de los componentes más importantes en maquinaria industrial y utilizados para automatización son los motores, estos son quienes proporcionan la potencia necesaria para accionar los componentes que posea un sistema. Existe una gran variedad de motores como estudia Chapman en [22].

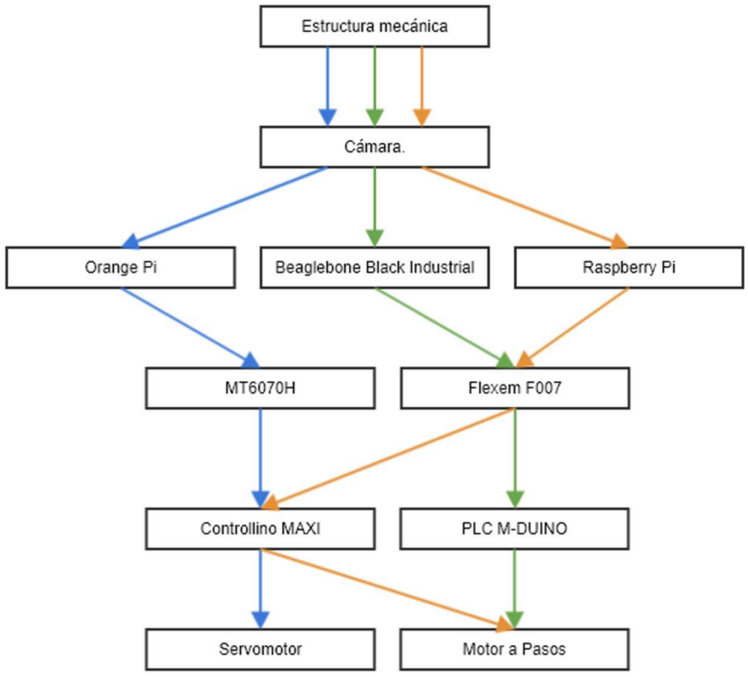
Tabla 2.11 Opciones para Motores.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
MOTOR A PASOS Figura 2.16 Motor a pasos NEMA 34. Fuente: National Instruments, [23].	Son un tipo especial de motor síncrono, están diseñados para girar un número específico de grados por cada pulso que se aplique al motor, otra característica importante de estos motores que al invertir los voltajes aplicados al motor es posible cambiar la dirección del paso que está dando. Para controlar los motores a pasos se requiere de una unidad de control o driver, esta es la encargada de interpretar las señales de un PLC, microcontrolador, tarjeta de desarrollo, etc., y aplicar los voltajes necesarios al motor para que se comporte de cierta manera.
SERVOMOTOR Figura 2.17 Servomotores Industriales. Fuente: Direct Industry, [24].	Están conformados por un motor, una caja reductora y un circuito de control, a este circuito de control se lo comanda mediante PWM, esto previene que se pierda la posición en que se lo coloca. Estos motores no poseen rotación, es decir que solo pueden girar de 0° a 180° o en algunos casos el ángulo máximo al cual se los puede colocar es 210° como menciona Roldán en [25].

2.2.4 MATRIZ MORFOLÓGICA.

La Tabla 2.12 presenta las posibles combinaciones de las soluciones presentadas para cada uno de los módulos que en conjunto presentan las alternativas para solucionar los requerimientos de todo el sistema. Estas alternativas deben ser analizadas en función a los requerimientos del cliente, disponibilidad de recursos, criterios técnicos, etc.

Tabla 2.12 Matriz Morfológica.

Función	Matriz
Soportar componentes	
Capturar Imagen	
Procesar Imagen	
Interactuar con el operador	
Controlar el sistema	
Automatización de movimientos	

Alternativa 1, Alternativa 2, Alternativa 3

2.3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS.

El análisis de alternativas se elabora con el método ordinal corregido de criterios ponderados, según Riba en [14], este método consiste en elaborar tablas con criterios, o soluciones a un determinado requerimiento. Cada criterio se compara con los restantes y se asigna los siguientes valores:

- 1: Si el criterio (o solución) de las filas es superior (o mejor; >) que el de las columnas.
- 0,5: Si el criterio (o solución) de las filas es equivalente (=) al de las columnas.

- 0: Si el criterio (o solución) de las filas es menor (o peor; <) que el de las columnas.

Después, para cada criterio se suman los valores asignados en relación a los restantes, al que se le añade una unidad con la finalidad de evitar que un criterio tenga valoración cero, el siguiente paso es calcular los valores ponderados para cada criterio en otra columna.

El paso final es la evaluación tota, es la sumatoria de los productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

2.3.1 ANÁLISIS DE RESIDUOS PONDERADOS

El método de residuos ponderados requiere evaluar los criterios más importantes para el diseño de la máquina de modo que se inicia definiendo estos criterios a continuación:

a) Costo: El desarrollo del presente proyecto tiene un presupuesto pre establecido, además la máquina debe tener un costo igual o inferior a los manipuladores de carga comerciales.
b) Utilidad: Es necesario que tanto el diseño como los componentes presten la mayor utilidad operativa al sistema, es decir aprovechar al máximo sus características.
c) Durabilidad: Al ser una máquina destinada para el ámbito industrial su durabilidad y manteneabilidad son de alta importancia, de esta manera se brinda seguridad y confianza al operar el sistema.
d) Conectividad: Los componentes deben ser de simple conexión entre sí, esto contribuye a en la simplicidad de mantenimiento, montaje y desmontaje
e) Control: Este criterio refiere a la programación de los elementos, el tipo de control que se debe aplicar a los mismos y el tipo de software necesario para realizar estas tareas.

La Tabla 2.13 muestra la ponderación de los criterios establecidos anteriormente.

Tabla 2.13 Ponderación de Criterios.

Costo > Durabilidad > Utilidad = Conectividad > Control							
Criterios	**Costo**	**Durabilidad**	**Utilidad**	**Conectividad**	**Control**	**Σ+1**	**Ponderación**
Costo		1	1	1	1	5	0,333
Durabilidad	0		1	1	1	4	0,267
Utilidad	0	0		0,5	1	2,5	0,167
Conectividad	0	0	0,5		1	2,5	0,167
Control	0	0	0	0		1	0,067
					Total	15	1

En las Tablas 2.14 a 2.18 se muestra la evaluación de las alternativas para cada uno de los criterios establecidos.

Tabla 2.14 Análisis del criterio Costo.

Alternativa2 > Alternativa3 > Alternativa 1					
Costo	**Alternativa1**	**Alternativa2**	**Alternativa3**	**Σ+1**	**Ponderación**
Alternativa1		0	0	1	0,167
Alternativa2	1		1	3	0,500
Alternativa3	1	0		2	0,333
			Total	6	1

Tabla 2.15 Análisis del criterio Durabilidad.

Alternativa1 > Alternativa2 = Alternativa3					
Durabilidad	**Alternativa1**	**Alternativa2**	**Alternativa3**	**Σ+1**	**Ponderación**
Alternativa1		1	1	3	0,500
Alternativa2	0		0,5	1,5	0,250
Alternativa3	0	0,5		1,5	0,250
			Total	6	1

Tabla 2.16 Análisis del criterio Utilidad.

Alternativa1 = Alternativa2 > Alternativa3					
Utilidad	**Alternativa1**	**Alternativa2**	**Alternativa3**	**Σ+1**	**Ponderación**
Alternativa1		0,5	1	2,5	0,385
Alternativa2	0,5		1	2,5	0,385
Alternativa3	0	0,5		1,5	0,231
			Total	6,5	1

Tabla 2.17 Análisis del criterio Conectividad.

Alternativa2 = Alternativa3 > Alternativa1					
Conectividad	**Alternativa1**	**Alternativa2**	**Alternativa3**	**Σ+1**	**Ponderación**
Alternativa1		0	0	1	0,167
Alternativa2	1		0,5	2,5	0,417
Alternativa3	1	0,5		2,5	0,417
			Total	6	1

Tabla 2.18 Análisis del criterio Control.

Alternativa1 = Alternativa2 > Alternativa3					
Control	**Alternativa1**	**Alternativa2**	**Alternativa3**	**Σ+1**	**Ponderación**
Alternativa1		0,5	1	2,5	0,385
Alternativa2	0,5		1	2,5	0,385
Alternativa3	0	0,5		1,5	0,231
			Total	6,5	1

Una vez realizado el análisis de las alternativas con los criterios se elabora una tabla de conclusiones, en la que se identifica la mejor alternativa mediante el análisis de las cuantificaciones realizadas, aquí la alternativa que posea el mayor valor de la suma del resultado de cada uno de los criterios aplicados a dicha alternativa será la mejor opción, esto se muestra en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19 Conclusiones.

Conclusión	**Costo**	**Durabilidad**	**Utilidad**	**Conectividad**	**Control**	**Σ**	**Prioridad**
Alternativa1	0,056	0,133	0,064	0,028	0,026	0,306	2
Alternativa2	0,167	0,067	0,064	0,069	0,026	0,393	1
Alternativa3	0,111	0,067	0,038	0,069	0,015	0,301	3

2.3.1.1 Cámaras

Las cámaras han ido tomando una parte fundamental en las industrias, como se muestra en la Tabla 2.20 existe una gran variedad de tipos para diferentes aplicaciones.

2.3.1.1.1 Selección de Cámara.

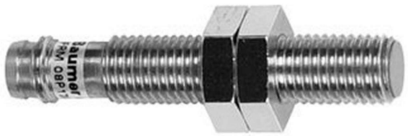
En vista que el proceso que realizará el sistema de volteo no requiere una alta velocidad en la adquisición de imágenes la mejor opción a implementar es una cámara de vigilancia, hoy en día este tipo de cámaras poseen alta fidelidad de imagen y son comercializadas a bajos precios, adicionalmente este tipo de cámaras se comunican con un computador por medio de conexiones Ethernet lo cual simplifica su implementación.

Tabla 2.20 Opciones para Cámara.

Elemento	Descripción
 Figura 2.18 Cámara de alta velocidad. Fuente: Infaimon Visión Artificial, [26]	Son utilizadas en procesos muy rápidos, como pruebas de choque, estudio de balística, estas cámaras son capaces de tomar de 1000 a 1000000 de imágenes por segundo.
 Figura 2.19 Cámaras de vigilancia. Fuente: Direct Industry, [27]	Tienen el uso más simple en el campo de la visión artificial, se las utiliza únicamente para monitoreo y en ciertos casos para detección de movimiento, esto no significa que no puedan ser utilizadas con la finalidad de detección de objetos, detección facial, etc.,
 Figura 2.20 Cámara Lineal Fuente: Infaimon, [28]	Estas cámaras realizan la construcción de la imagen línea por línea, es decir que es necesario que la cámara o el objeto se desplace linealmente uno con respecto al otro, este método de construcción de imagen es utilizado en procesos que se requiera alta resolución de las imágenes

2.3.1.2 Sensores

Industrialmente existen una gran variedad de sensores, entre estos se encuentran los utilizados para limitar el movimiento de mecanismos evitando que estos sobrepasen su límite operativo y dañen la máquina y sus componentes, estos son los necesarios para delimitar los movimientos del sistema de volteo.

Elemento	Descripción
 Figura 2.21 Fines de Carrera. Fuente: Suyi Group, [29]	Estos son dispositivos de conmutación accionados mecánicamente cuando un objeto entra en contacto con la palanca del fin de carrera y lo acciona, los fines de carrera, comercialmente se los encuentra en dos configuraciones que son: • Normalmente Abiertos. • Normalmente Cerrados.
 Figura 2.22 Sensor de proximidad inductivo. Fuente: Direct Industry, [30].	Los sensores de proximidad, o sensores de distancia son utilizados en procesos con movimientos autónomos, teniendo un rango de medición que va desde 0.5 mm a 20 mm, estos sensores pueden ser de tipo capacitivo o inductivo como menciona Hyde en [31].

2.3.1.2.1 Selección de Sensores.

Se utilizará fines de carrera en la implementación de los límites operativos del sistema de volteo, esta decisión es tomada basados en los requerimientos del cliente analizados en la sección 2.1 del presente documento, el costo de implementación de sensores de proximidad es muy elevado en comparación a los fines de carrera, adicionalmente en presencia de polvo, viruta, residuos metálicos los sensores de proximidad pueden presentar mal funcionamiento, mientras que los fines de carrera son resistentes a estos elementos, al estar ubicado el sistema de volteo en el área de soldadura la presencia de estos residuos es inminente.

2.3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.

Como conclusión de la Tabla 2.19 realizada por el método de residuos ponderados se identifica que la Alternativa 2 es la mejor para el diseño del sistema de volteo. Esta Alternativa está compuesta por:

- Una estructura mecánica en la cual se soportará los componentes.
- Una cámara IP para la adquisición de imagen.
- Un PLC M-DUINO el cual estará encargado del control.
- Una placa Beaglebone Black Industrial que será la encargada de correr los algoritmos de visión artificial.
- Una pantalla touch Flexem F007 para la interacción y visualización del estado de la máquina.
- Motores a Pasos encargados de realizar los movimientos necesarios para posicionar los compartimentos de motor y accionar el mecanismo de sujeción.
- Sensores tipo final de carrera para determinar los límites de acción de la máquina.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE VOLTEO

3.1 DISEÑO MECÁNICO.

En esta sección se elaboran los cálculos necesarios para obtener una estructura estable y resistente. Se analizan vigas, columnas y ejes, para determinar el material y la geometría de los componentes estructurales para el sistema.

3.1.1 MODELO PRELIMINAR DE LA MÁQUINA.

El diseño estructural del sistema de volteo para compartimentos de motor inicia con el modelo preliminar presentado en la Figura 3.1, en base a la geometría indicada se realizan los cálculos para comprobar que el diseño sea el adecuado. El modelo preliminar se lo desarrolla en el software CAD Autodesk Inventor 2015, con licencia educativa. El sistema se encuentra dividido en estructuras para mejorar su comprensión tanto en el diseño como en el ensamblaje, dichas estructuras se enlistan a continuación.

1. Mecanismo de Giro 1.
2. Mecanismo de Giro 2.
3. Estructura Suspendida.
4. Extensión Torre.
5. Torre.
6. Soporte KBK.

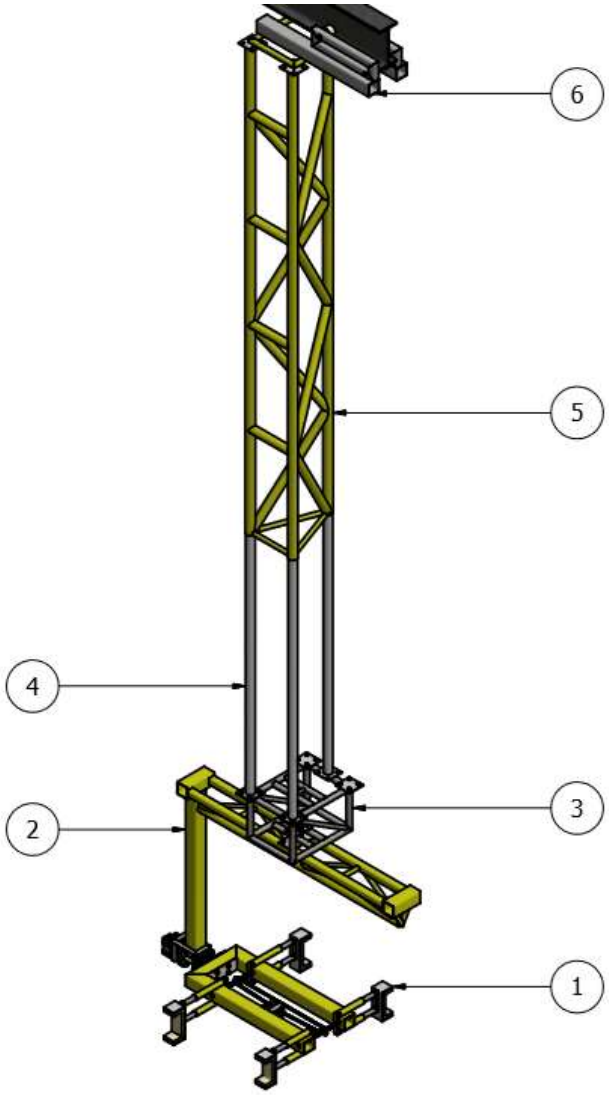


Figura 3.1 Modelo Preliminar.

El sistema debe realizar dos giros para posicionar el compartimento de motor en el JIG de soldadura, los ejes de rotación, donde el eje x es un eje paralelo al suelo y el eje y se encuentra perpendicular a este.

3.1.2 DISEÑO DE MECANISMO DE GIRO EN X.

El mecanismo de giro que se muestra en la Figura 3.2, es el encargado de posicionar el compartimento de motor en la posición de montaje. Los elementos que comprende este mecanismo son:

- 1.- Tornillo de potencia.
- 2.- Piñón.
- 3.- Mecanismo de sujeción.

- 4.- Eje horizontal.
- 5.- Viga soporte.
- 6.- Brazo soporte.
- 7.- NEMA 17.
- 8.- Cadena.

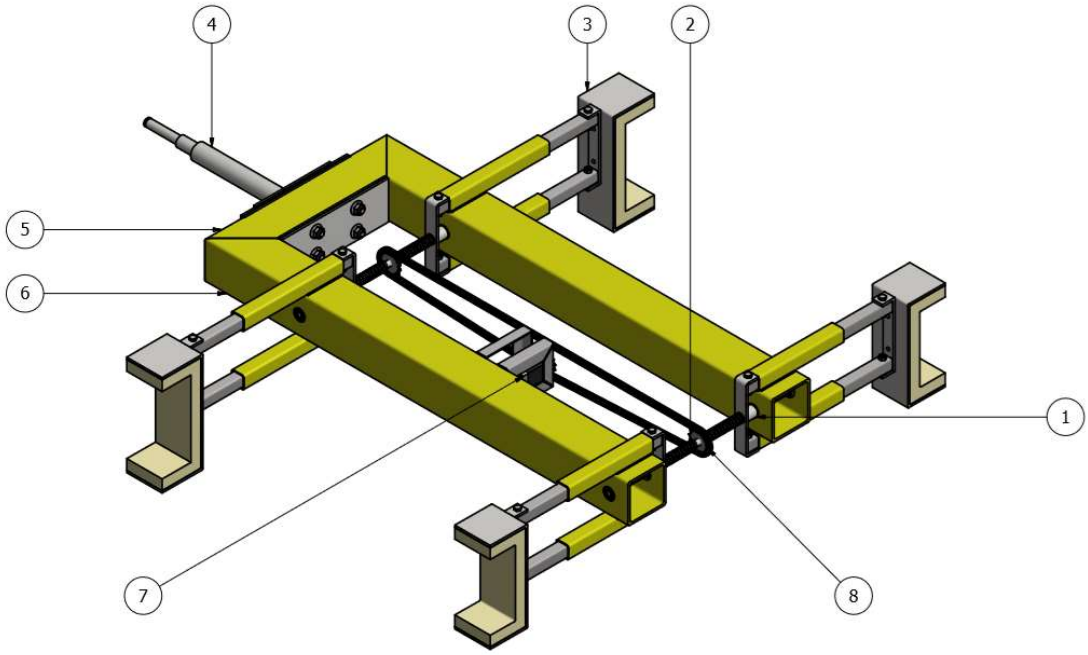


Figura 3.2 Mecanismo de giro en X.

A continuación, se desarrolla el cálculo de los diferentes componentes que conforman el mecanismo de giro 1 con la finalidad de brindar a el sistema las características dimensionales y mecánicas adecuadas para asegurar su correcto funcionamiento.

3.1.2.1 Cálculo del Mecanismo de Sujeción.

El mecanismo de sujeción es el encargado de inmovilizar el compartimento de motor para que el sistema pueda manipularlo de forma segura, se lo muestra en la Figura 3.3.

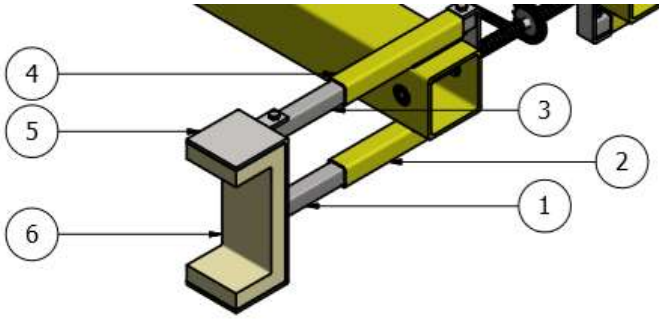


Figura 3.3 Mecanismo de Sujeción.

El mecanismo de sujeción consta de las siguientes partes:

- 1.- Viga inferior.
- 2.- Apoyo inferior.
- 3.- Viga superior.
- 4.- Apoyo superior.
- 5.- Abrazadera.
- 6.- Esponja

En posición horizontal los elementos que soportan el peso del compartimento de motor, 50 kg +/- 2 kg, son los que se encuentran en la Figura 3.4, viga superior e inferior, al sujetarse el compartimento de motor por al lado derecho e izquierdo, cada uno de los mecanismos de sujeción soporta la mitad de dicho peso.

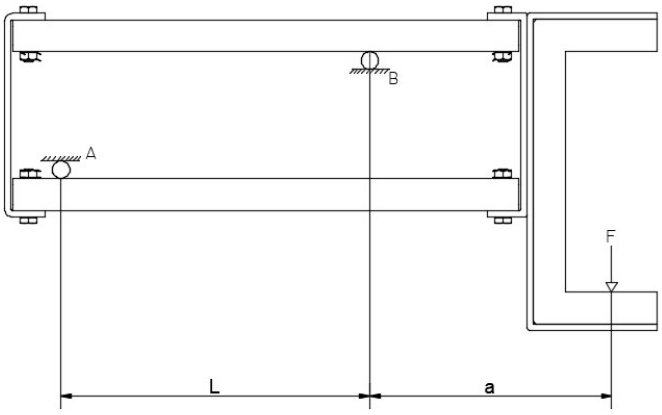


Figura 3.4 Diagrama de Cuerpo Libre de Viga Simplemente Apoyada.

De manera que se puede observar que las vigas se encuentran sobre dos apoyos simples, según Mott en [32] (La necesidad de considerar flexiones de vigas), se debe considerar una flexión máxima permisible dependiendo de la aplicación:

- Parte general de la máquina
- Precisión moderada
- Alta precisión

Para este caso se considera necesaria una precisión moderada debido a que el efecto de flexión en este elemento puede provocar que el compartimento de motor se libere por deslizamiento de modo que para el criterio de precisión moderara se utiliza la ecuación (3.1):

$$y_{máx} = 0.0005\ de\ la\ longitud\ de\ la\ viga.$$

$$y_{máx} = 0.0005 * L \tag{3.1}$$

$$y_{máx} = 0.0005 * 0.175\ m$$

$$y_{máx} = 8.75x10^{-5}m\ \approx 0.0875\ mm$$

Para una viga simplemente apoyada, se utiliza la ecuación (3.2) para calcular su deflexión los valores de L y a son $0.075\ m$ y $0.1\ m$ respectivamente.

$$y_c = \frac{Fa^2}{3EI}(L + a) \tag{3.2}$$

Donde:

- F: Fuerza [N].
- E: Módulo de Young [GPa].
- I: Inercia de la sección transversal [m^4].
- L: Distancia entre apoyos [m].
- a: Longitud del voladizo [m].
- y_c: Deflexión en el extremo del voladizo [m].

Para determinar la sección transversal que deben poseer las vigas del mecanismo de sujeción, se despeja la inercia de la ecuación (3.2) obteniéndose la ecuación (3.3). Una vez obtenido este valor, se busca en un catálogo de perfiles estructurales un perfil que posea dicho valor de inercia o uno superior. Los perfiles metálicos que se encuentran en el mercado ecuatoriano tienen calidad ASTM A-500.

$$I = \frac{Fa^2}{3Ey_{máx}}(L + a) \tag{3.3}$$

$$I = \frac{255\ N * (0.1\ m)^2}{3 * (200\ GPa) * (8.75x10^{-5}\ m)} * (0.075\ m + 0.1\ m)$$

$$I = 8.5x10^{-9}\ m^4$$

Al tratarse de una figura compuesta la que conforma el mecanismo de sujeción y no una viga simple es necesario recurrir al teorema de Steiner, ecuación (3.4), para calcular la inercia de la figura compuesta.

$$I = I_{cg} + Ad^2 \tag{3.4}$$

Donde:

- I: Inercia de la figura compuesta [m^4].
- I_{cg}: Inercia de la sub-figura desde su centro de masa [m^4].
- A: Area de la figura [m^2].
- d: Distancia perpendicular desde el eje del centro de gravedad de la figura compuesta hasta el centro de gravedad de la sub-figura [m].

En el Anexo B.1 se presentas las especificaciones generales para tubería estructural cuadrada, el perfil de menor dimensión es el de 20 x 20 mm, la tubería con 2 mm de espesor posee la mayor inercia. En el mecanismo de sujeción las dos vigas se encuentran perpendicularmente separadas una distancia de 9.9 cm con respecto a sus centros de gravedad, de manera que la inercia de la figura compuesta es:

$$I = I_{Viga\ Superior} + I_{Viga\ Inferior}$$

$$I = \left(0.69\ cm^4 + (1.34\ cm^2 * (4.95\ cm)^2)\right) + \left(0.69\ cm^4 + (1.34\ cm^2 * (4.95\ cm)^2)\right)$$

$$I = 67.0467\ cm^4\ \approx 6.70467x10^{-7}\ m^4$$

Al ser el valor de inercia del cuerpo compuesto mayor al requerido por el cálculo de rigidez, se concluye que la selección del perfil estructural cuadrado de 20 x 20 mm con 2 mm de espesor es adecuada debido a que la deflexión que tendrá este cuerpo será menor al límite establecido de deflexión máxima.

3.1.2.2 Cálculo de Brazo Soporte.

En los dos brazos soporte se sujetará el compartimento de motor, de modo que aquí recaerá todo el peso de este. La longitud de los brazos es de 0,6 m, con esta medida se busca determinar la sección transversal que los brazos deben poseer para soportar la carga.

El brazo soporte actúa como una viga en voladizo con carga en el extremo, como se muestra en Figura 3.5.

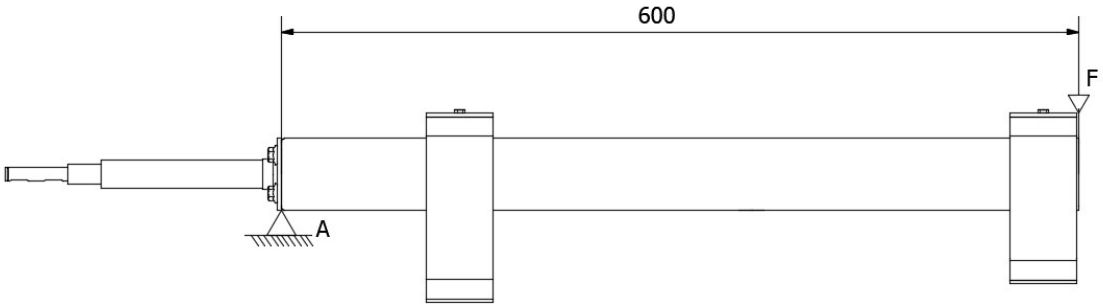


Figura 3.5 Diagrama de cuerpo libre del Brazo Soporte.

Para estos elementos del mecanismo de giro en “x” también se considera una deflexión máxima considerando el criterio de precisión moderada, utilizando la ecuación (3.1):

$$y_{máx} = 0.0005 * 0.6\ m$$

$$y_{máx} = 3x10^{-4}\ m \approx 0.3\ mm$$

Para una viga en voladizo, la flexión resultante al aplicar una fuerza en el extremo se calcula con la ecuación (3.5).

$$y_f = \frac{FL^3}{3EI} \tag{3.5}$$

Donde:

- F: Fuerza [N].
- L: Longitud de la viga [m].
- E: Módulo de Young [GPa].
- I: Inercia de la sección transversal [m^4].
- y_f: Deflexión [m].

Para determinar la sección transversal, se utiliza la ecuación (3.3), una vez calculado se busca en un catálogo de perfiles estructurales un perfil que posea un valor de inercia mayor o igual al obtenido en el cálculo.

$$I = \frac{510\ N * (0.6\ m)^3}{3 * (200\ GPa) * (3x10^{-4}\ m)}$$

$$I = 6.12x10^{-7}\ m^4$$

En el Anexo B.1 el perfil más adecuado es el perfil cuadrado de 75 x 75 mm y 4 mm de espesor.

3.1.2.3 Cálculo de Viga Soporte.

Esta viga, numeral 5 de la Figura 3.2, se encuentra sometida a dos esfuerzos, uno flector debido al peso del compartimento de motor, los brazos de soporte y mecanismos de sujeción, y un esfuerzo de torsión debido a los pesos anteriormente mencionados y el brazo de palanca que proporcionan los brazos de soporte. Teniendo todo esto en cuenta el cálculo se debe asegurar que este elemento se mantenga dentro de los límites de deformación para cada caso.

3.1.2.3.1 Deflexión por Esfuerzo Flector.

En la Figura 3.6 se observa la manera cómo actúan las cargas sobre este elemento donde F es el peso del compartimento de motor más el peso de los mecanismos de sujeción. Para el diseño se considera una aplicación de precisión moderada, de modo que se utiliza la ecuación (3.1).

$$y_{máx} = 0.0005 * 0.9\ m$$

$$y_{máx} = 4.5x10^{-4}\ m \approx 0.45\ mm$$

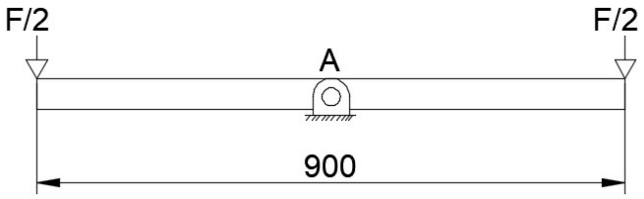


Figura 3.6 Diagrama de Cuerpo Libre Viga Soporte sometida a Flexión.

La Figura 3.6 puede ser interpretada como una viga simplemente apoyada con carga en el centro, de modo que la fuerza que se aplica sobre el punto A es:

$$\sum Fy = 0$$

$$R_A = \frac{F}{2} + \frac{F}{2}$$

$$R_A = F = 608\ N$$

Para calcular la deflexión en una viga simplemente apoyada con carga en el centro se utiliza la ecuación (3.6), para encontrar las dimensiones adecuadas para la viga se despeja la inercia y con este valor se determina la geometría a ser aplicada.

$$y_{máx} = \frac{FL^3}{48EI} \tag{3.6}$$

Donde:

- F: Fuerza [N].
- L: Longitud de la viga [m].
- E: Módulo de Young [GPa].
- I: Inercia de la sección transversal [m^4].
- $y_{máx}$: Deflexión máxima [m].

Despejando la inercia de (3.6) y considerando que la viga tiene una longitud de 0.9 m se obtiene la ecuación (3.7):

$$I = \frac{FL^3}{48Ey_{máx}} \tag{3.7}$$

$$I = \frac{608\ N * (0.9\ m)^3}{48 * (200\ GPa) * (4.5x10^{-4}\ m)}$$

$$I = 1.026x10^{-7}\ m^4\ \approx 10.26\ cm^4$$

En el Anexo B.1 se encuentra que el perfil más adecuado para cumplir con la deflexión máxima calculada es el de 40 mm de lado y 3 mm de espesor, sin embargo, por motivos de estandarización el perfil que se implementa es uno de 75 mm de lado y 4 mm de espesor, al realizar este reemplazo se aumenta la rigidez de la estructura.

3.1.2.3.2 Deflexión por Esfuerzo de Torsión.

La Figura 3.7 muestra el efecto de torsión al cual está sometida la viga soporte, según Mott en [33] existe una deflexión torsional máxima dependiendo de la aplicación, de igual manera que para el caso de flexión se utiliza un criterio de precisión moderada.

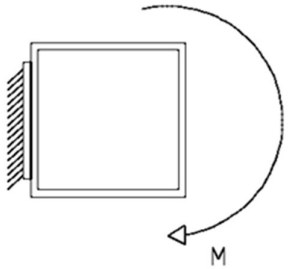


Figura 3.7 Diagrama de Cuerpo Libre Viga Soporte sometida a Torsión.

Para calcular el ángulo que gira la viga por el efecto de torsión se utiliza la ecuación (3.8).

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \tag{3.8}$$

Donde:

- T: Torque [N*m].
- L: Longitud de la viga desde el punto de anclaje a donde se aplica el torque [m].
- G: Módulo de elasticidad cortante [GPa].
- J: Momento polar de inercia [m^4].

El torque que se aplica a cada extremo de la viga soporte se obtiene como resultado de multiplicar el peso del compartimento de motor que soporta cada brazo por la longitud del mismo como se muestra a continuación en la ecuación (3.9).

$$T = P_{c\,motor} + P_{msujeción} + P_{brazo} \tag{3.9}$$

$$T = (255\ N + 9.47\ N + 50.5\ N) * 0.6\ m$$

$$T = 212.7\ Nm$$

Para determinar el momento polar de inercia se aplica la ecuación (3.10)

$$J = bh^3 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{h}{b} \left(1 - \frac{\left({}^{h}/_{b} \right)^4}{12} \right) \right) \tag{3.10}$$

Donde:

- J: Momento polar de inercia [m^4].
- b, h: Dimensiones de los lados del perfil rectangular [m].

El módulo de elasticidad cortante es una característica propia de los materiales, para el caso de aceros aleados y al carbón simple toma un valor de 80 GPa. En el caso de la deformación por torsión se utiliza el criterio de precisión moderada al igual que en el caso de flexión, de modo que el ángulo que el perfil se deforma debe permanecer dentro del siguiente rango, $1.4x10^{-5}\ a\ 6.9x10^{-4}\ rad$.

Aplicando las ecuaciones (3.8) y (3.10) se obtiene la ecuación (3.11):

$$J = J_{Externo} - J_{Interno} \tag{3.11}$$

$$J_{Externo} = (0.075\ m)^4 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{0.075\ m}{0.075\ m} \left(1 - \frac{\left({}^{0.075\ m}/_{0.075\ m} \right)^4}{12} \right) \right)$$

$$J_{Externo} = (0.067\ m)^4 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{0.067\ m}{0.067\ m} \left(1 - \frac{\left({}^{0.067\ m}/_{0.067\ m} \right)^4}{12} \right) \right)$$

$$J = 4.456x10^{-6} m^4 - 2.837x10^{-6}\ m^4$$

$$J = 1.6181x10^{-6}\ m^4$$

$$\theta = \frac{709\ N * 0.45\ m}{80\ GPa *\ 1.6181x10^{-4}\ m^4}$$

$$\theta = 7.39x10^{-4}\ rad$$

Al encontrarse que el perfil seleccionado no satisface con el criterio de precisión moderada se considera reforzar con placas de 4 mm de espesor las caras laterales del perfil, de esta manera se obtiene nuevamente aplicando (3.11):

$$J_{Externo} = 0.083\ m * (0.075\ m)^3 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{0.075\ m}{0.083\ m} \left(1 - \frac{\left({}^{0.075\ m}/_{0.083\ m} \right)^4}{12} \right) \right)$$

$$J_{Externo} = (0.067\ m)^4 \left(\frac{1}{3} - 0.21 \frac{0.067\ m}{0.067\ m} \left(1 - \frac{\left({}^{0.067\ m}/_{0.067\ m} \right)^4}{12} \right) \right)$$

$$J = 5.396x10^{-6} m^4 - 2.837x10^{-6}\ m^4$$

$$J = 2.558x10^{-6}\ m^4$$

$$\theta = \frac{709\ N * 0.45\ m}{80\ GPa *\ 2.558x10^{-6}\ m^4}$$

$$\theta = 4.68x10^{-4}\ rad$$

Realizando el refuerzo en las paredes se obtiene una deformación aceptable de acuerdo con el criterio de deformación seleccionado.

3.1.2.4 Cálculo de Eje de Giro.

Este es el elemento más importante de esta parte del sistema, es el encargado de transmitir el movimiento del motor a la viga de soporte y los brazos de soporte para

lograr girar el compartimento de motor. También se encarga de soportar todo el peso de estos elementos como se indica en la Figura 3.8, es por esto que el criterio de diseño por rigidez para este elemento es de alta precisión con la ecuación (3.12).

$$y_{máx} = 0.00001\ de\ la\ longitud\ de\ la\ viga.$$

$$y_{máx} = 0.00001 * L \tag{3.12}$$

$$y_{máx} = 0.00001 * 0.185\ m$$

$$y_{máx} = 1.85x10^{-6}\ m \approx 0.00185\ mm$$

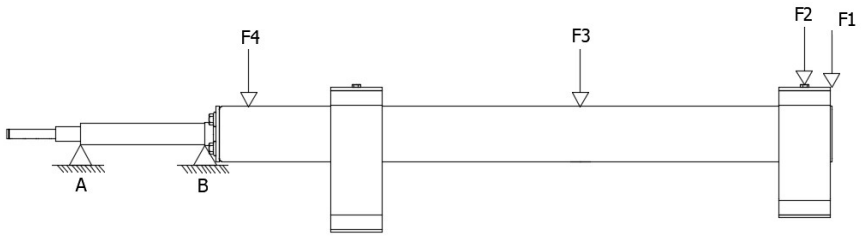


Figura 3.8 Diagrama de Cuerpo Libre Eje.

En los puntos A y B se encuentran ubicados las chumaceras que alojan al eje, Figura 3.9, mismas que se encuentran separados una distancia de 17 cm, el extremo en voladizo del eje tiene una longitud de 1.5 cm. Las fuerzas F1 a F4 son aquellas que actúan sobre los brazos de soporte y por consecuencia afectan al eje.

- F1: Mecanismo de sujeción y punto en donde recae el peso del compartimento de motor.
- F2: Peso de los brazos de soporte.
- F3: Peso de la viga soporte.

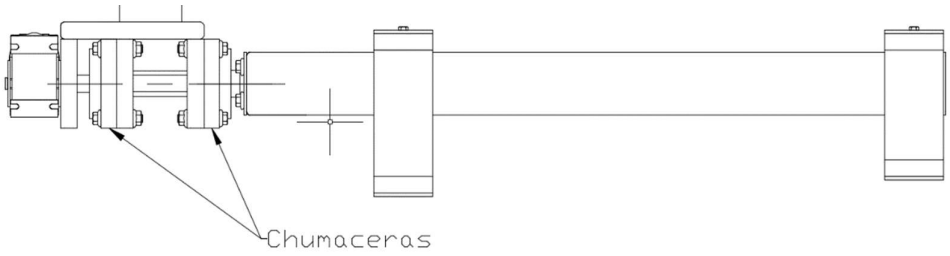


Figura 3.9 Posición de Chumaceras

En la Tabla 3.1 se presentan los valores que poseen cada una de estas fuerzas y la distancia a la cual se encuentran con respecto al punto B.

Tabla 3.1 Valores de Fuerzas actuantes.

Viga Soporte	Brazo Soporte	Sujeción	Carga	Unidad
75,7638	101,0184	14,50008	510	N
0,0605	0,3605	0,6105	0,6105	m

Con el diagrama de cuerpo libre, Figura 3.8, y las fuerzas que intervienen, Tabla 3.1, en el sistema se calcula las reacciones que estas fuerzas ocasionan en los puntos A y B.

$$\sum Fy = 0$$

$$R_A - R_B + F1 + F2 + F3 = 0$$

$$R_A - R_B = -705.73001\ N$$

$$\sum M_B = 0$$

$$R_A * 0.175\ m = (F1 * D1) + (F2 * D2) + (F3 * D3)$$

$$R_A = 2141.70748\ N$$

$$R_B = 2847.43749\ N$$

La Figura 3.10 muestra el diagrama de cortantes y la Figura 3.11 muestra el diagrama de momentos que actúan sobre el eje cuando este se encuentra cargado, es decir con el compartimento de motor.

Figura 3.10 Diagrama de Cortantes, con carga.

Fuente: viga.online

Figura 3.11 Diagrama de Momentos, con carga.

Fuente: viga.online

Cuando el sistema se encuentra descargado las reacciones en los puntos A y B, y los diagramas de cortantes, Figura 3.12, y momentos, Figura 3.13, cambian como se muestra a continuación.

$$\sum Fy = 0$$

$$R_A - R_B + F1 + F2 + F3 + F4 = 0$$

$$R_A - R_B = -195.73001\ N$$

$$\sum M_B = 0$$

$$R_A * 0.175\ m = (F1 * D1) + (F2 * D2) + (F3 * D3)$$

$$R_A = 310.207476\ N$$

$$R_B = 505.937486\ N$$

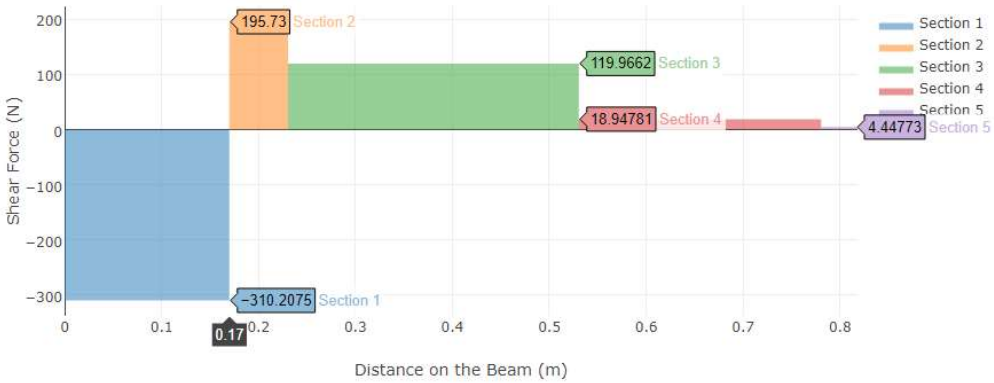


Figura 3.12 Diagrama de Cortantes, sin carga.

Fuente: viga.online

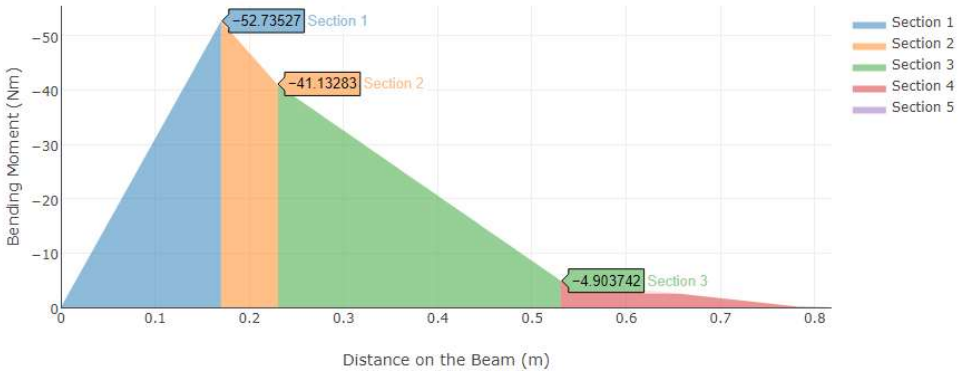


Figura 3.13 Diagrama de Momentos, sin carga.

Fuente: viga.online

Para calcular la deflexión máxima que debe tener el eje se utiliza la ecuación (3.3), posteriormente se obtiene el diámetro adecuado del eje. La calidad del eje es AISI 4337.

$$I = \frac{705.73\ N * (0.015\ m)^2}{3 * (210\ GPa) * (1.85x10^{-6}\ m)} * (0.17 + 0.015)$$

$$I = 2.52046x10^{-6}\ m^4$$

La inercia de una sección circular está dada por la ecuación (3.13).

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \tag{3.13}$$

Donde:

- D: Diámetro de la sección circular [m].
- I: Inercia de la sección circular [m^4].

Se despeja el valor de diámetro de la ecuación (3.13), obteniéndose la ecuación (3.14).

$$D = \sqrt[4]{\frac{64I}{\pi}} \tag{3.14}$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{64 * (2.52046x10^{-6}\ m^4)}{\pi}}$$

$$D = 0.0267\ m\ \approx 26.7\ mm$$

Con la finalidad de estandarizar las medidas del eje a las medidas que comercialmente se encuentran los rodamientos y se elaboran los ejes, el diámetro seleccionado para el eje será de 30 mm.

Una vez realizado el diseño por rigidez y determinado las dimensiones del eje, se procede a comprobar mediante análisis dinámico que el eje seleccionado tolere el trabajo para el cual se lo diseñó.

Mediante la Figura 3.11 se observa que en el rodamiento del punto B se encuentra el mayor momento tanto cuando el sistema se encuentra cargado como cuando está sin carga, de modo que este será el punto de análisis. El momento flector máximo que es ejercido en este punto es de 364.09 Nm, y el mínimo es de 52.73 Nm, adicionalmente al eje se le aplicará un torque de 100 Nm, el cual se encarga de realizar el giro del compartimento de motor.

Al tratarse de una sección circular, el esfuerzo normal y cortante se calculan mediante las ecuaciones (3.15) y (3.16) respectivamente.

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi D^3} \tag{3.15}$$

$$\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi D^3} \tag{3.16}$$

Donde:

- σ_x: Esfuerzo normal [MPa].
- τ_{xy}: Esfuerzo cortante [MPa].
- M: Momento flector [Nm].
- T: Torque [Nm].
- D: Diámetro de la sección circular [m].

Aplicando las ecuaciones (3.15) y (3.16) se obtiene:

$$\sigma_{fmáx} = \frac{32 * 364.0902\ Nm}{\pi * (0.03\ m)^3} \qquad \sigma_{fmin} = \frac{32 * 52.735271\ Nm}{\pi * (0.03\ m)^3}$$

$$\sigma_{fmáx} = 137.3552\ MPa \qquad \sigma_{fmin} = 19.895\ MPa$$

$$\tau_{xy} = \frac{16 * 100\ Nm}{\pi * (0.03\ m)^3}$$

$$\tau_{xy} = 18.8628\ MPa$$

Para analizar al eje con el trabajo al que está sometido se utilizan las ecuaciones para diseño por fatiga, el efecto de fatiga se debe a la carga y descarga a la cual estará sometido el sistema. La ecuación (3.17) relaciona los esfuerzos que afectan el elemento diseñado, el material del mismo y un factor de seguridad.

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sut} = \frac{1}{n} \tag{3.17}$$

Donde:

- σ_a: Esfuerzo alternante [MPa].
- σ_m: Esfuerzo medio [MPa].
- Se: Límite a la fatiga del material [MPa].
- Sut: Resistencia a la tracción del material [MPa].
- n: Factor de seguridad.

El límite a la fatiga del material debe ser calculado en base factores modificadores como expresan Budynas y Nisbett en [34] con la ecuación (3.18).

$$Se = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * Se' \tag{3.18}$$

Donde:

- k_a: Factor de acabado superficial.
- k_b: Factor de tamaño.
- k_c: Factor de carga.
- k_d: Factor de temperatura.
- k_e: Factor de efectos diversos.

El valor del término Se' depende del valor de resistencia a la tracción del material (Sut) del elemento a diseñarse, las condiciones para estimar este valor se muestran a continuación.

$$Se' = \begin{cases} 0.5Sut & Sut \leq 1400MPa\ (200Kpsi) \\ (100\ Kpsi) & Sut > (200Kpsi) \\ 700\ MPa & Sut > 1400\ MPa \end{cases}$$

En el catálogo de aceros de Ivan Bohman C.A. [35] se encuentran las propiedades mecánicas del acero AISI 4337, cuyo Sut tiene un valor de 882 MPa, de modo que el valor de Se' será:

$$Se' = 0.5 * 882\ MPa$$

$$Se' = 441\ MPa$$

Ahora se calculan los valores de los factores modificadores, para el factor de acabado superficial se emplea la ecuación (3.19).

$$k_a = aSut^b \tag{3.19}$$

Donde los valores de a y b se obtienen de la Tabla 3.2 tomada de [34].

Tabla 3.2 Parámetros en el factor de la condición superficial.

Acabado Superficial	Factor a		Exponente
	Sut, [Kpsi]	Sut, [Mpa]	b
Esmerilado	1,34	1,58	-0,085
Maquinado o Laminado en frío	2,7	4,51	-0,265
Laminado en caliente	14,4	57,7	-0,718
Como sale de la forja	39,9	272	-0,995

El valor del factor k_a es:

$$k_a = 4.51(441\ MPa)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.7475$$

El factor de tamaño se lo determina en dependencia de las siguientes condiciones:

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2\ pulg \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10\ pulg \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51\ mm \\ 1.511d^{-0.157} & 51 < d \leq 254\ mm \end{cases}$$

El valor del factor k_b es:

$$k_b = 1.24(30)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.8617$$

El factor de carga se lo determina en dependencia de las siguientes condiciones:

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

Cuando el eje se encuentra sometido a esfuerzos combinados, en este caso un esfuerzo de flexión y un esfuerzo de torsión, para el cálculo se determinan dos factores de carga, un factor de carga de flexión y un factor de carga de torsión respectivamente.

$$k_{cf} = 1;\ k_{ct} = 0.59$$

El factor de temperatura tiene un valor $k_d = 1$ debido a que el elemento se encuentra trabajando a temperatura ambiente.

Finalmente, el factor de efectos diversos se calcula mediante la ecuación (3.20).

$$k_e = \frac{1}{1 + q(k_t - 1)} \tag{3.20}$$

Donde:

- q: Sensibilidad a la muesca, Figura 3.14 tomada de [34].
- k_t: Factor de concentración de esfuerzos, Figura 3.15 y Figura 3.16 tomadas de [36].

El factor q se obtiene al intersecar el valor del diámetro de la muesca, ubicados en la parte superior o inferior de la figura dependiendo de las unidades que se esté empleando, con la curva de la resistencia a la tracción (Sut) del material. Mientras que el valor de Kt se obtiene de la intersección entre la relación de radio de la muesca sobre el diámetro menor y la relación entre diámetro mayor y diámetro menor.

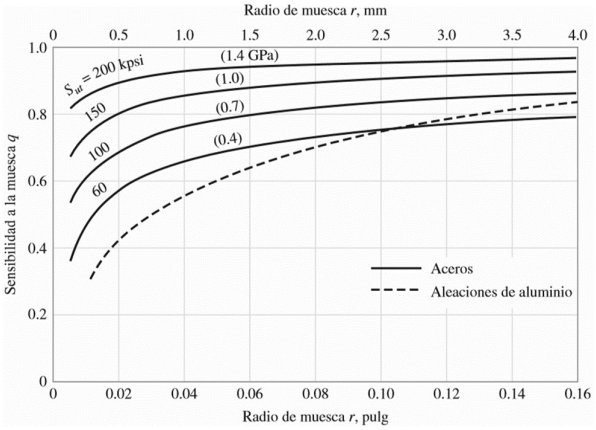


Figura 3.14 Sensibilidad a la muesca.

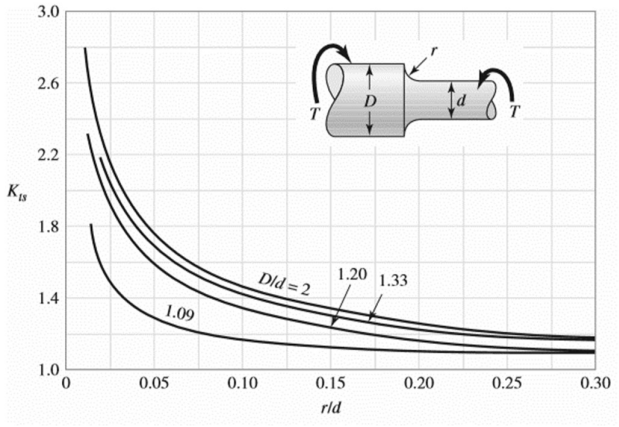


Figura 3.15 Factor de Concentración de Esfuerzos, torsión.

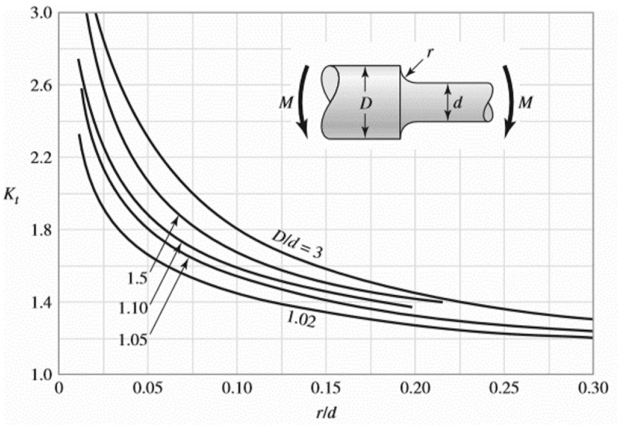


Figura 3.16 Factor de Concentración de Esfuercos, flexión.

Al igual que en el caso del factor de carga, se tienen dos factores de efectos diversos, uno para el caso de flexión y otro para el caso de torsión. La presentación final del eje es la que se muestra en la Figura 3.17 siendo $d = 30\ mm$, $D = 32\ mm$ y $r = 0.9\ mm$.

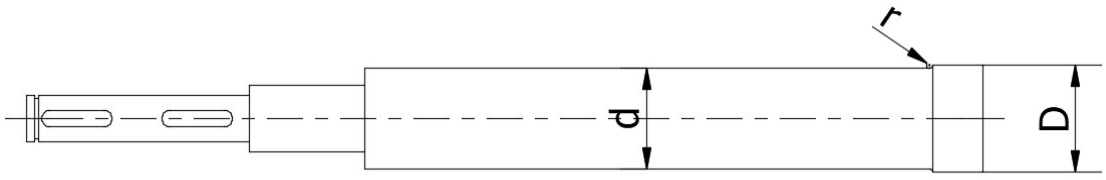


Figura 3.17 Eje Horizontal.

$$k_{ef} = \frac{1}{1 + 0.75 * (1.95 - 1)}$$

$$k_{ef} = 0.58394$$

$$k_{et} = \frac{1}{1 + 0.75 * (1.4 - 1)}$$

$$k_{et} = 0.76923$$

Este caso el eje se encuentra sometido a la acción de esfuerzos combinados, lo que provoca que la ecuación (3.10) cambie ligeramente a la ecuación (3.21).

$$\frac{\sigma_a{}'}{Se} + \frac{\sigma_m{}'}{Sut} = \frac{1}{n} \tag{3.21}$$

Donde:

- $\sigma_a{}'$: Esfuerzo alternante equivalente [MPa].
- $\sigma_m{}'$: Esfuerzo medio equivalente [MPa].

Los nuevos esfuerzos equivalentes abarcan los esfuerzos alternantes y medios respectivamente de los esfuerzos de flexión, torsión y axial junto con los factores modificadores que afecta a cada uno de ellos como se muestra en las ecuaciones (3.22) y (3.23) a continuación.

$$\sigma_a' = \sqrt{\left[\left(\frac{k_{ef}}{k_{cf} * k_{bf}}\right)\sigma_{af} + \left(\frac{k_{ex}}{k_{cx} * k_{bx}}\right)\sigma_{ax}\right]^2 + 3\left[\frac{k_{et}}{k_{ct} * k_{bt}}\tau_{xy}\right]^2} \tag{3.22}$$

$$\sigma_m' = \sqrt{\left(\sigma_{mf} + \sigma_{mx}\right)^2 + 3{\tau_{xy}}^2} \tag{3.23}$$

Para calcular los esfuerzos alternante y medio se emplea las ecuaciones (3.24) y (3.25).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{min}}{2} \tag{3.24}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{min}}{2} \tag{3.25}$$

Aplicando las ecuaciones (3.24) y (3.25) se obtiene los valores de los esfuerzos medio y alternante ocasionados por el momento flector.

$$\sigma_{af} = \frac{137.36\ MPa - 19.895\ MPa}{2}$$

$$\sigma_{af} = 58.7302\ MPa$$

$$\sigma_{mf} = \frac{137.36\ MPa + 19.895\ MPa}{2}$$

$$\sigma_{mf} = 78.625\ MPa$$

Una vez obtenidos los valores de esfuerzo medio y alternante del esfuerzo flector, se reemplaza estos valores en las ecuaciones (3.22) y (3.23) para obtener los valores equivalentes, esto se lo realiza a continuación.

$$\sigma'_a = \sqrt{\left[\left(\frac{0.58394}{1 * 0.8617}\right) 58.7302\ MPa\right]^2 + 3\left[\frac{0.76923}{0.59 * 0.8617} 18.863\ MPa\right]^2}$$

$$\sigma'_a = 105.3892\ MPa$$

$$\sigma'_m = \sqrt{(78.625\ MPa)^2 + 3(18.863\ MPa)^2}$$

$$\sigma'_m = 85.1428\ MPa$$

Al encontrarse los factores modificadores en la ecuación (3.23), para el cálculo del límite a la fatiga del material se retira los factores kb, kc, ke de la ecuación (3.18), dando como resultado la ecuación (3.26):

$$Se = k_a * Se' \tag{3.26}$$

$$Se = 0.7475 * 441\ MPa$$

$$Se = 329.66\ MPa$$

Una vez obtenidos los valores equivalentes es posible reemplazarlos en la ecuación (3.21) para obtener el factor de seguridad que se obtiene del eje con las dimensiones realizadas en el diseño por rigidez.

$$n = \frac{1}{\frac{105.3892\ MPa}{329.66\ MPa} + \frac{85.1428\ MPa}{882\ MPa}}$$

$$n = 2.4025$$

Obtener un valor de n mayor a 1 indica que el elemento no fallará y se lo puede sobrecargar con 2.4 veces el peso para el cual se lo diseño.

3.1.2.5 Selección de Rodamientos.

Con el eje diseñado se procede a la selección de los rodamientos que se encuentran posicionados en los puntos A y B de la Figura 3.8, primero se especifica la carga de diseño con la ecuación (3.27).

$$F = VxF_r + yF_a \tag{3.27}$$

Donde:

- F: Carga de diseño [kN].
- F_r: Carga Radial [kN].
- F_a: Carga axial [kN].
- V: Factor de giro de pista, $V = \begin{cases} 1 & Si\ gira\ la\ pista\ interna \\ 1.2 & Si\ gira\ la\ pista\ externa \end{cases}$
- x: Factor de carga radial.
- y: Factor de carga axial.

Inicialmente se asume los valores de “x” y de “y” como 1 y 1.5 respectivamente tanto para el rodamiento A como para el rodamiento B, esto se hace como paso inicial de diseño, las cargas radiales son las reacciones máximas calculadas en la sección 3.1.2.4 en los puntos A y B respectivamente.

Rodamiento A:

$$F = (1 * 1 * 2.1417\ kN) + (1.5 * 0\ kN)$$

$$F = 2.1417\ kN$$

Rodamiento B:

$$F = (1 * 1 * 2.8474\ kN) + (1.5 * 0\ kN)$$

$$F = 2.8474\ kN$$

El tipo de rodamiento escogido es rígido de bolas, no se posee una carga axial que actúe sobre ellos. Analizando los factores de carga obtenidos para los dos rodamientos, es notable que el mayor valor se encuentra en el punto B, de manera que los dos rodamientos serán seleccionados utilizando esta carga por motivos de estandarización de elementos. Ya identificada la carga de diseño se utiliza la ecuación (3.28) para estimar la capacidad de carga dinámica requerida.

$$C_{req} = \frac{f_l}{f_n} F \tag{3.28}$$

Donde:

- C_{req}: Capacidad de carga dinámica requerida [kN].
- F: Carga de diseño [kN].
- f_l: Factor de esfuerzos dinámicos.

- f_n: Factor de velocidad.
- f_t: Factor de temperatura.

El factor f_l se determina en función de la vida útil para la cual se selecciona el rodamiento, se estima una vida útil de 1000 horas de trabajo, mientras que el factor f_n depende la velocidad a que gira, para calcular este valor consideramos que el compartimento debe rotar 180° en un tiempo de aproximadamente 5 segundos de modo que se utiliza la ecuación (3.29):

$$\omega = \frac{\theta}{t} \tag{3.29}$$

$$\omega = \frac{\pi\ rad}{5\ s}$$

$$\omega = \frac{\pi\ rad}{5\ s} * \frac{1\ rev}{2\pi\ rad} * \frac{60\ s}{1\ min}$$

$$\omega = 6\ rpm$$

Con los valores de vida útil y velocidad de giro, en la sección “Dimensionado” de [37] para obtener los valores de los factores de esfuerzos dinámicos y velocidad.

$$f_l = 1.26$$

$$f_n = 1.49$$

Calculamos la capacidad de carga dinámica requerida.

$$C_{req} = \frac{1.26}{1.49} * 2.8474\ kN$$

$$C_{req} = 2.4078\ kN$$

El rodamiento requiere de un alojamiento adecuado, por esta razón se opta por la opción de adquirir una chumacera, para seleccionar este tipo de unidades, en la sección “Unidades FAG de rodamientos S” de [37] se busca el diámetro de eje requerido, para un eje de 30 mm de diámetro se selecciona:

- Unidad de soporte: F76206.2RSR
    - Rodamiento: 76206.2RS
    - Soporte: F206

El siguiente paso es comprobar que el rodamiento que posee la unidad seleccionada cumpla con la capacidad de carga dinámica, esta debe ser mayor o igual a C_{req}. En la

sección “Rodamientos FAG tipo S para ejes métricos y en pulgadas” de [37] se encuentra que el rodamiento posee una capacidad de carga dinámica mayor a 2.4078 kN, de manera se verifica que la unidad F76206.2RSR es adecuada.

3.1.2.6 Cálculo de Tornillo de Potencia

El tornillo a diseñarse será utilizado para abrir y cerrar el mecanismo de sujeción, la sujeción se realiza por la parte interior del compartimento de motor, para esto es necesario que cuando el motor de accionamiento gire, las tuercas del lado derecho e izquierdo se desplacen en direcciones opuestas. Este efecto se consigue cuando el tornillo posee rosca a derecha y rosca a izquierda como se aprecia en la Figura 3.18, en el lado derecho del tornillo se encuentra roscado a derecha y el lado izquierdo se encuentra roscado a izquierda.

Figura 3.18 Tornillo de Potencia.

Con esta configuración, cuando el sentido de giro es horario, las tuercas se desplazan linealmente hacia el centro del tornillo, y cuando el sentido de giro es anti-horario, las tuercas se desplazan hacia los extremos del tornillo.

Una característica fundamental que se busca al momento de diseñar este elemento roscado es la de auto bloqueo, esto quiere decir que la tuerca únicamente puede ser impulsada por el tornillo, si se aplica una fuerza directamente a la tuerca el tornillo no girará. La condición de auto bloqueo únicamente sucede si se cumple la relación descrita en la ecuación (3.30) según Shigley en [38].

$$\mu\, \pi\, dm > l \tag{3.30}$$

Donde:

- μ: Coeficiente de fricción (Tornillo-Tuerca).
- dm: Diámetro medio o diámetro primitivo.
- l: avance.

Ahora se procede a comprobar si para la geometría del tornillo se cumple esta relación, el tornillo posee las siguientes dimensiones: Diámetro exterior 15 mm,

Diámetro interior 10 mm, Paso 6 mm, rosca cuadrada. Para encontrar el diámetro primitivo se utiliza la ecuación (3.31).

$$dm = \left(De - \frac{p}{2}\right) \tag{3.31}$$

Donde:

- De: Diámetro exterior.
- p: Paso.
- dm: Diámetro primitivo.

Se aplica la ecuación (3.31):

$$dm = \left(15\ mm - \frac{6\ mm}{2}\right)$$

$$dm = 12\ mm$$

Para el coeficiente de fricción o rozamiento según Serway en [39], el coeficiente de fricción entre acero y acero es de 0.57 como se puede observar en la Figura 3.19.

Coeficientes de fricción

	μ_s	μ_k
Hule sobre concreto	1.0	0.8
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.4
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Madera sobre madera	0.25–0.5	0.2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0.14	0.1
Madera encerada sobre nieve seca	—	0.04
Metal sobre metal (lubricado)	0.15	0.06
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Hielo sobre hielo	0.1	0.03
Articulación sinovial en humanos	0.01	0.003

Nota: Todos los valores son aproximados. En algunos casos el coeficiente de fricción puede superar 1.0.

Figura 3.19 Coeficientes de fricción estática y cinética.

Fuente: Serway, [39].

A continuación, se confirma la condición de auto bloqueo utilizando la ecuación (3.30), considerando que el tornillo posee una sola entrada entonces el valor del avance es igual al del paso, $l = p$.

$$0.57 * \pi * 12\ mm > 6\ mm$$

$$21.488\ mm > 6\ mm$$

Con este resultado se comprueba que el tornillo posee la propiedad de auto bloqueo, esto es necesario cuando el compartimento esté girando, el tornillo no ceda cuando todo el peso del compartimento actúe sobre la tuerca.

Cabe aclarar que la apertura y cierre del mecanismo de sujeción se realiza en posición horizontal, de modo que el tornillo no deberá vencer únicamente el valor de la fuerza de rozamiento del mecanismo de sujeción.

En cuanto a la tuerca esta debe ser capaz de soportar el peso del compartimento cuando este se encuentre girando, para esto se comprueba si el material soportará cizalladura aplicando la ecuación (3.32):

$$\frac{F}{\pi\ dm\ \frac{h}{2}} \leq \frac{Ssy}{\eta} \tag{3.32}$$

Donde:

- F: Fuerza [N].
- dm: Diámetro primitivo [m].
- h: Altura de la tuerca [m].
- Ssy: Esfuerzo de fluencia al corte [Pa].
- η: Factor de seguridad:

La condición de diseño más crítica se da si un solo tornillo soporta todo el peso del compartimento, esto quiere decir, una fuerza $F = 510\ N$ y el acero en el cual es construido es el AISI 1045 cuyo límite a la fluencia es $Sy = 180MPa$. Para aplicar la teoría de Von Mises, según Shigley en [38], el esfuerzo de fluencia al corte se calcula mediante la ecuación (3.33).

$$Ssy = 0.577\ Sy \tag{3.33}$$

$$Ssy = 0.577(180\ MPa)$$

$$Ssy = 103.86\ MPa$$

Se comprueba la relación de la ecuación (3.32) asumiendo un factor de seguridad igual a $\eta = 2$.

$$\frac{510\ N}{\pi\ 0.012\ m\ \frac{0.02\ m}{2}} \leq \frac{103.86\ MPa}{2}$$

$$1.35\ MPa \leq 51.93\ MPa$$

Se puede observar que la relación se cumple, este comportamiento principalmente se debe a las características mecánicas del material.

3.1.3 DISEÑO DE MECANISMO DE GIRO EN Y.

Este mecanismo de giro se muestra en la Figura 3.20, este es el encargado de colocar el compartimento de motor en la posición adecuada para que encaje en el JIG de soldadura.

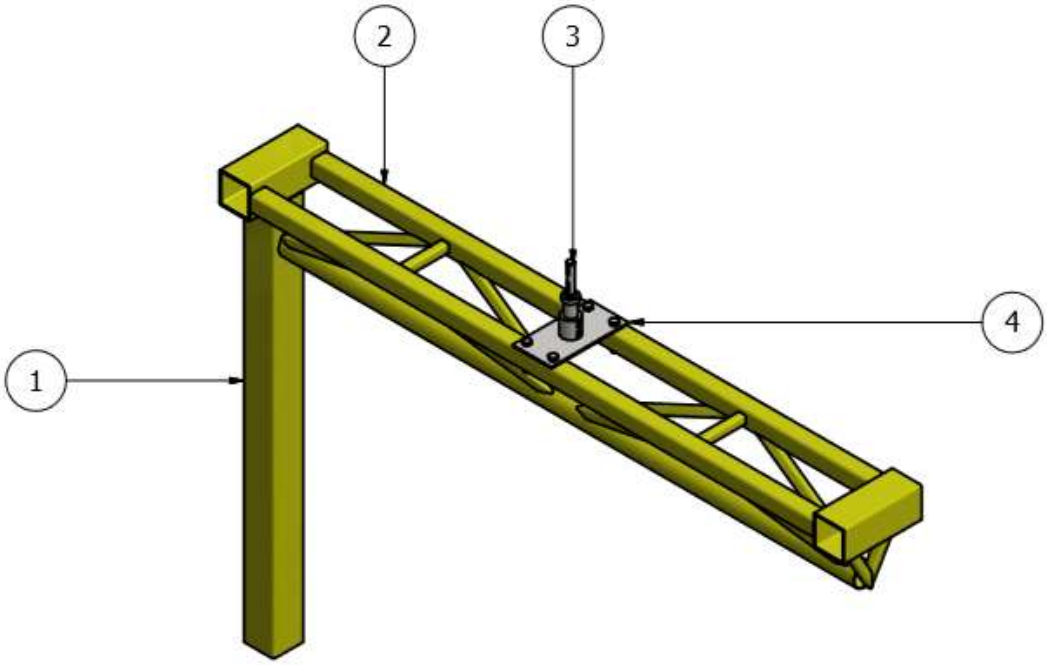


Figura 3.20 Mecanismo de Giro en Y

Los elementos que componen este mecanismo son:

1. Columna Soporte.
2. Estructura de Soporte.
3. Eje de giro.
4. Brida.

3.1.3.1 Cálculo de Columna Soporte.

En la Figura 3.21 se puede observar las fuerzas que actúan sobre esta columna, este elemento se encuentra sometido a tracto compresión y flexión al momento de cargar y descargar el sistema, de modo que para el diseño de este componente se recurre al análisis dinámico.

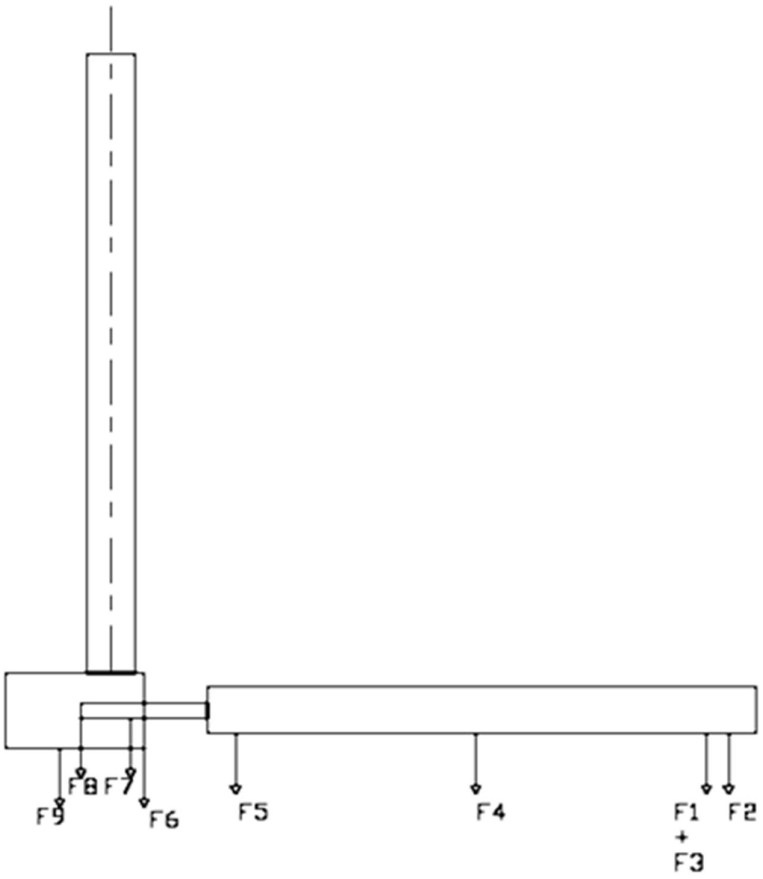


Figura 3.21 Diagrama de Cuerpo Libre.

Los valores de las fuerzas y su posición con respecto al eje central de la columna de 75 x 75 mm con 4 mm de espesor, se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores de Fuerzas.

Elemento	Carga [N]	Distancia [m]	Nomenclatura
Chumacera	11,662	0,085	F9
Base Chumacera.	19,6882	0,01012	F8
Punto cero	-	-	-
Eje de giro	0,4625	0,0075	F7
Chumacera	11,662	0,085	F6
Viga Soporte	75,7638	0,129	F5
Brazo Soporte	101,0184	0,429	F4
Sujeción	14,50008	0,679	F3
Carga extra	4,44773	0,7165	F2
Carga	510	0,679	F1

Con estos datos se encuentra la carga equivalente realizando sumatoria de fuerzas.

Fuerza máxima, cuando el sistema se encuentra cargado:

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{máx} = \sum_{i=1}^{8} F_i = 749.20471\ N$$

Fuerza mínima, cuando el sistema se encuentra sin carga.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{min} = \sum_{i=2}^{8} F_i = 239.20471\ N$$

Momento máximo en el punto cero.

$$\sum M_0 = 0$$

$$M_{máx} = \sum_{i=1}^{8} F_i * d_i = 412.237\ Nm$$

Momento mínimo en el punto cero.

$$\sum M_0 = 0$$

$$M_{min} = \sum_{i=2}^{8} F_i * d_i = 65.947\ Nm$$

Una vez establecidas las fuerzas máximas y mínimas, se calcula el esfuerzo axial máximo y mínimo, con la ecuación (3.34), los valores generales del perfil se los encuentra en el Anexo B.1.

$$\sigma_x = \frac{F}{A} \tag{3.34}$$

Donde:

- σ_x: Esfuerzo Axial [Pa].
- F: Fuerza [N].
- A: Área [m^2].

Esfuerzo axial máximo:

$$\sigma_{x_{máx}} = \frac{F_{máx}}{A}$$

$$\sigma_{x_{máx}} = \frac{749.20471\ N}{10.95\ cm^2}$$

$$\sigma_{x_{máx}} = 684.21\ KPa$$

Esfuerzo axial mínimo:

$$\sigma_{x_{min}} = \frac{F_{min}}{A}$$

$$\sigma_{x_{min}} = \frac{239.20471\ N}{10.95\ cm^2}$$

$$\sigma_{x_{min}} = 218.45\ KPa$$

Con los momentos máximo y mínimo se calcula el esfuerzo flector al cual está sometido el elemento con la ecuación (3.35).

$$\sigma_f = \frac{M * C}{I} \tag{3.35}$$

Donde:

- σ_f: Esfuerzo por Momento Flector [Pa].
- M: Momento Flector [Nm].
- C: Distancia desde el eje neutro al punto de análisis [m].
- I: Inercia de la sección transversal [m^4].

Esfuerzo flector máximo:

$$\sigma_{f_{máx}} = \frac{412.237\ Nm * 0.0375\ m}{89.98\ cm^4}$$

$$\sigma_{f_{máx}} = 17.18\ MPa$$

Esfuerzo flector mínimo:

$$\sigma_{f_{min}} = \frac{65.947\ Nm * 0.0375\ m}{89.98\ cm^4}$$

$$\sigma_{f_{min}} = 2.7484\ MPa$$

Una vez obtenidos los valores máximos y mínimos de los esfuerzos que actúan sobre el elemento, se calculan los esfuerzos medio y alternante tanto axial como flector con las ecuaciones (3.24) y (3.25).

Esfuerzo axial alternante:

$$\sigma_{ax} = \frac{684.21\ KPa - 218.45\ KPa}{2}$$

$$\sigma_{ax} = 232.8767\ KPa$$

Esfuerzo axial medio:

$$\sigma_{mx} = \frac{684.21\ KPa + 218.45\ KPa}{2}$$

$$\sigma_{mx} = 451.3285\ KPa$$

Esfuerzo flector alternante:

$$\sigma_{af} = \frac{17.18\ MPa - 2.7484\ MPa}{2}$$

$$\sigma_{af} = 7.2159\ MPa$$

Esfuerzo flector medio:

$$\sigma_{mf} = \frac{17.18\ MPa + 2.7484\ MPa}{2}$$

$$\sigma_{mf} = 9.9643\ MPa$$

Para los factores modificadores se utilizan las ecuaciones y condiciones mencionados en la sección 3.1.2.4.

Factor de superficie k_a:

$$k_a = 4.51 * (270\ MPa)^{-0.265}$$

$$k_a = 1.0229$$

Para el factor de tamaño se va a obtener uno para la carga axial k_{bx} y uno para la carga flectora k_{bf}. El factor k_b depende del diámetro de la sección del elemento, pero al tratarse de una sección no circular, es necesario encontrar el diámetro efectivo, para el caso de la tubería estructural de 75 x 75 mm y 4 mm de espesor, el diámetro efectivo se calcula con la ecuación (3.36).

$$d_e = 0.808\sqrt{A^2 - (A - 2e)^2} \tag{3.36}$$

Donde:

- d_e: Diámetro efectivo [mm].
- A: Tamaño del lado del perfil [mm].
- e: Espesor del perfil [mm].

Diámetro efectivo:

$$d_e = 0.808\sqrt{(75\ mm)^2 - \left(75\ mm - (2 * 4\ mm)\right)^2}$$

$$d_e = 27.2333\ mm$$

Con el diámetro efectivo se aplica las condiciones para el factor k_b.

$$k_{bf} = 1.24 * (27.2333)^{-0.107}$$

$$k_{bf} = 0.8706;\ \ k_{bx} = 1$$

De igual manera que con el factor de tamaño, el factor de carga va a tener un valor para la carga axial y uno para la carga flectora.

$$k_{cx} = 0.85; k_{cf} = 1$$

El factor de temperatura tiene un valor de 1, ya que el elemento trabaja en temperatura ambiente. De igual manera el factor de efectos varios tiene un valor de 1 debido a que el elemento no posee muescas.

Una vez calculados los factores modificadores se calculan los esfuerzos equivalentes tanto alternante como medio mediante las ecuaciones (3.15) y (3.16) respectivamente.

$$\sigma'_a = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{1 * 0.8706}\right) * 7.2159\ MPa + \left(\frac{1}{0.85 * 1}\right) * 232.8767\ KPa\right]^2}$$

$$\sigma'_a = 8.5615\ MPa$$

$$\sigma'_m = 9.9643\ MPa + 451.3285\ KPa$$

$$\sigma'_m = 10.4157\ MPa$$

El límite a la fatiga del material para este elemento se calcula mediante la ecuación (3.37).

$$S_e = k_a * S'_e \tag{3.37}$$

$$S_e = 1.0229 * (0.5 * 270MPa)$$

$$S_e = 138.10166\ MPa$$

Finalmente, mediante la ecuación (3.21) se calcula el factor de seguridad que el elemento posee.

$$n = \frac{1}{\left(\frac{8.5615\ MPa}{138.10166\ MPa} + \frac{10.4157\ MPa}{270\ MPa}\right)}$$

$$n = 9.9431$$

Un factor de seguridad elevado, $n > 5$ indica que el elemento no fallará por el efecto de carga y descarga, además revela que el elemento posee un comportamiento rígido, esto normalmente sucede cuando se realiza diseño por el criterio de rigidez y a continuación se verifica las dimensiones seleccionadas mediante análisis dinámico.

3.1.3.2 Cálculo de Estructura Soporte.

La estructura soporte, Figura 3.22, es la encargada de resistir y mantener nivelado el compartimento de motor junto con el mecanismo de giro 1, por esta razón se busca incrementar la inercia de esta estructura utilizando una configuración de sección transversal como la que se muestra en la Figura 3.23.

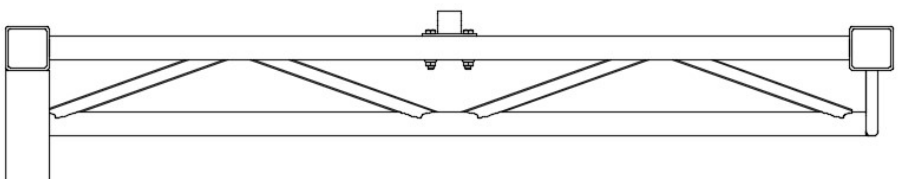


Figura 3.22 Vista lateral de la estructura soporte

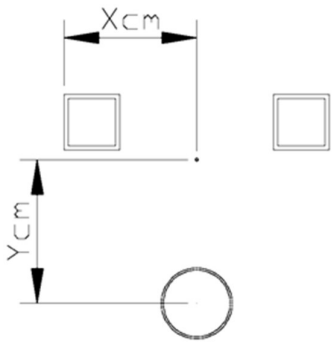


Figura 3.23 Sección transversal de estructura soporte.

La inercia de esta figura compuesta se calcula mediante el teorema de Steiner, ecuación (3.4), pero antes es necesario hallar el centro de masa. La Tabla 3.4 contiene los datos de las áreas que componen la Figura 3.23 así como las distancias desde el eje neutro hacia cada una de ellas.

Tabla 3.4 Datos para hallar centro de masa [cm].

Fig	Área	x	y	Ax	Ay
1	4,44	2	13	8,88	57,72
2	4,44	17	13	75,48	57,72
3	2,32	9,5	0	22,04	0
Σ	11,2	-	-	106,4	115,44

El centro de masa posee las coordenadas Xcm y Ycm que se calculan mediante las ecuaciones (3.38) y (3.39) respectivamente.

$$Xcm = \frac{\sum Ax}{\sum Área} \tag{3.38}$$

$$Xcm = \frac{106.4\ cm^3}{11.2\ cm^2}$$

$$Xcm = 9.5\ cm$$

$$Ycm = \frac{\sum Ay}{\sum Área} \tag{3.39}$$

$$Ycm = \frac{115.44\ cm^3}{11.2\ cm^2}$$

$$Ycm = 10.3\ cm$$

Aplicando el teorema de Steiner, ecuación (3.4) la Inercia resultante de la figura compuesta es de:

$$I = 338.185x10^{-6}\ m^4$$

A continuación, se calcula las sumatorias tanto de fuerzas como de momentos que actúan sobre la estructura soporte, las fuerzas actuantes y las distancias desde el punto de análisis hacia cada una de las fuerzas se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de Fuerzas y Distancias actuantes

Elemento	Carga [N]	Distancia [m]
Motor	29,40	0,80
Viga 3	80,52	0,73
Chumacera	11,66	0,81
Base Ch.	11,39	0,74
Eje	0,46	0,72
Chumacera	11,66	0,64
75x75	75,76	0,62
75x75	101,02	0,31
Sujecion	14,50	0,05
Carga Extra	4,45	0,01
Carga	510,00	0,05
-	-	-
Contrapeso	280,000	0,729

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{máx} = \sum_{i=1}^{8} F_i = 1130{,}82\ N$$

La fuerza obtenida es la que actúa directamente sobre la estructura soporte. Aplicando las ecuaciones (3.1) y (3.7) obtenemos el valor de inercia que necesita la estructura para cumplir el criterio de la ecuación (3.1).

$$y_{máx} = 0.0005 * 1.458\ m$$

$$y_{máx} = 7.29x10^{-4} m\ \approx 0.000729\ mm$$

$$I = \frac{1130.82\ N * (1.458\ m)^3}{48 * (200\ GPa) * (7.29x10^{-4}\ m)}$$

$$I = 5x10^{-7}\ m^4\ \approx 50.08\ cm^4$$

Como se puede apreciar, la figura compuesta posee un valor más alto de inercia, lo que implica que la deflexión por efecto de una carga será menor. Aplicando la Ecuación (3.6) encontramos la fuerza que hará que la estructura soporte se deforme $0.000729\ mm$.

$$F = \frac{48 y_{máx}\, E\, I}{L^3} = \frac{48 * (200\ GPa) * (7.29x10^{-4}\ m) * (338.185x10^{-6}\ m^4)}{(1.458\ m)^3}$$

$$F = 7636.2988\ N$$

El Factor de seguridad con el que se estará trabajando se calcula mediante el producto de la Fuerza máxima de operación y la Fuerza actuante como se expresa en la ecuación (3.40)

$$\eta = \frac{F}{F_{máx}} \tag{3.40}$$

$$\eta = \frac{7636.2988\ N}{1130.82\ N} = 6.75$$

Este factor de seguridad indica que la estructura soporte se deformará una distancia menor a la deflexión máxima permitida.

3.1.3.3 Cálculo de Eje de Giro.

El eje vertical que se presenta en la Figura 3.24 se lo debe diseñar bajo el criterio de esfuerzo combinados, debido a la carga y descarga a la que va a estar sometido.

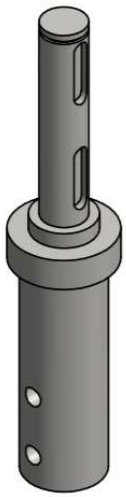


Figura 3.24 Eje Vertical.

Las Fuerzas máxima y mínima son aquellas que actúan cuando el mecanismo está cargado y descargado respectivamente y poseen los siguientes valores.

$$F_{máx} = 1131.98\ N$$

$$F_{min} = 721.98\ N$$

De igual forma sucede con los momentos máximos y mínimos que el eje soportará, los valores se los presenta a continuación.

$$M_{máx} = 11.59\ Nm$$

$$M_{min} = 8.81\ Nm$$

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.1.3.1 ahora se calcula los esfuerzos axiales y flectores máximos y mínimos mediante las ecuaciones (3.15) y (3.34), considerando que el área de para una sección circular de 25 mm de diámetro es igual a $0.00049078\ m^2$

La Tabla 3.6 presenta los valores de los esfuerzos máximos y mínimos que actúan sobre el eje.

Tabla 3.6 Esfuerzo normal y flector para eje de giro 2.

	Máx	Min	
σx	2509781,4	1470817,93	Pa
σf	7561068,44	5748790,2	Pa

A continuación, aplicando las ecuaciones (3.24) y (3.25) se calcula los esfuerzos medio y alternante tanto para la carga axial como para la carga flectora, estos valores se presentan a continuación en la Tabla 3.7

Tabla 3.7 Valores de esfuerzos alternate y medio.

σax	519481,734	Pa	0,51948173	MPa
σmx	1990299,67	Pa	1,99029967	MPa
σaf	906139,119	Pa	0,90613912	MPa
σmf	6654929,32	Pa	6,65492932	MPa

Ahora se encuentran los factores modificadores de la ecuación (3.18) y de este modo poder aplicar las ecuaciones (3.22) y (3.23). Los factores modificadores se presentan en la Tabla 3.8

Tabla 3.8 Factores modificadores.

ka	0,74752783		
kbt	0,87870299	kbx	1
kcf	1	kcx	0,85
kd	1		
kef	0,58394161		
ket	0,67226891	q	0,75
kex	0,54794521	kt	1,95

Aplicando las ecuaciones (3.22) y (3.23) se obtienen los siguientes valores:

$$\sigma_a' = 22.0049\ MPa$$

$$\sigma_m' = 19.156\ MPa$$

Finalmente, para obtener el factor de seguridad del presente diseño se aplica la ecuación (3.17) obteniendo como resultado:

$$\eta = 11.3$$

Este factor asegura que el eje en presencia de carga y descarga no presentará deformaciones, esto último contribuye a la rigidez con la que se diseña cada elemento.

3.1.3.4 Selección de Rodamiento 2.

La selección del rodamiento se realiza con el procedimiento utilizado en la sección 3.1.2.5 y adicionalmente considerando que el eje vertical no gira a altas revoluciones y se encuentra bajo el efecto de una carga axial, es posible seleccionarlo directamente en base a las dimensiones del eje que alojará, con todo esto en consideración obtenemos que el rodamiento para esta aplicación es un rodamiento axial de la serie 51105.

3.1.4 DIMENSIONAMIENTO DE MOTORES.

El sistema cuenta con 3 motores, el primero se encarga de la apertura y cerradura del mecanismo de sujeción, el segundo se encarga del giro del compartimento de motor en torno al eje paralelo al suelo y el tercero realiza el giro en torno al eje perpendicular al suelo.

La selección de motores a pasos se lo realiza mediante el torque y la velocidad angular, de modo que es necesario calcular la inercia de los componentes que interactúan con el motor.

3.1.4.1 Motor para Sistema de Sujeción.

El sistema de sujeción cuenta con dos tornillos de rosca cuadrada cuya inercia fue obtenida mediante software CAD y cada uno tiene una inercia igual a $5.607\ kg * mm^2$.

La longitud del tornillo a recorrer es de $75.5\ mm$ para cada mitad del tornillo, esta distancia se debe cubrir en 2 segundos, el tornillo tiene un paso de 6 mm, mediante la ecuación (3.41) se obtiene el número de revoluciones necesarias para cubrir esta distancia.

$$Rev = \frac{L}{p} \tag{3.41}$$

$$Rev = \frac{75.5\ mm}{6\ mm} = 12.58\ rev$$

Las 12.58 revoluciones se las debe realizar en un tiempo de 2 segundos, aplicando la ecuación (3.42) se obtiene la velocidad necesaria del motor.

$$w = \frac{rev}{s} \tag{3.42}$$

$$w = \frac{12.58\ rev}{2\ s} = 377\ RPM = 39.53\ {}^{rad}/_{s}$$

Con este resultado es posible calcular el torque del motor mediante la ecuación (3.43)

$$T = I * a = I * \frac{w}{t} \tag{3.43}$$

Al emplearse dos tornillos en el mecanismo de sujeción los valores de inercia se suman.

$$T = 2 * (5.607\ kg * mm^2) * \frac{39.532\ {}^{rad}/_{s}}{1\ s}$$

$$T = 443.2\ {}^{kg * mm^2}/_{s^2} = 4.432x10^{-4}\ Nm$$

Con este valor de torque, el motor Nema 17, cuyo torque nominal es de $0.420\ Nm$ como se puede constatar en el Anexo B.2, es el seleccionado para esta operación.

3.1.4.2 Motor para Giros de Posicionamiento.

El mecanismo de giro con mayor inercia es el que está compuesto por el mecanismo de Giro 1 y la estructura suspendida, en total su inercia es de 155.35 kg m^2, el valor de inercia rotacional del compartimento de motor es de 775.75 kg m^2, los valores de inercia fueron obtenidos mediante software CAD.

El Giro de posicionamiento es de 0.5 revoluciones, que se las debe realizar en un tiempo de 10 segundos, aplicando la ecuación (3.42) se obtiene la velocidad necesaria del motor.

$$w = \frac{0.5\ rev}{10\ s} = 3\ RPM = 0.314\ {}^{rad}/_{s}$$

Con este resultado ahora se calcula el torque del motor mediante la ecuación (3.43). La inercia a vencer por el motor será la suma de la inercia del compartimento más la de los mecanismos de giro.

$$T = (930.9296\ kg * m^2) * \frac{0.314\ {}^{rad}/_{s}}{10\ s}$$

$$T = 29.24\ Nm$$

Con este valor de torque, el motor Nema 23, cuyo torque nominal es de 1.1 Nm de acuerdo al Anexo B.3, acoplado a una caja reductora con relación de reducción 30:1 es posible alcanzar el torque requerido para realizar los movimientos de posicionamiento.

3.2 DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.

El diseño eléctrico y electrónico del sistema involucra los módulos de automatización y control descritos en la Sección 2.2.2, a continuación en la Figura 3.25 se presentan las conexiones entre los elementos que componen estos módulos.

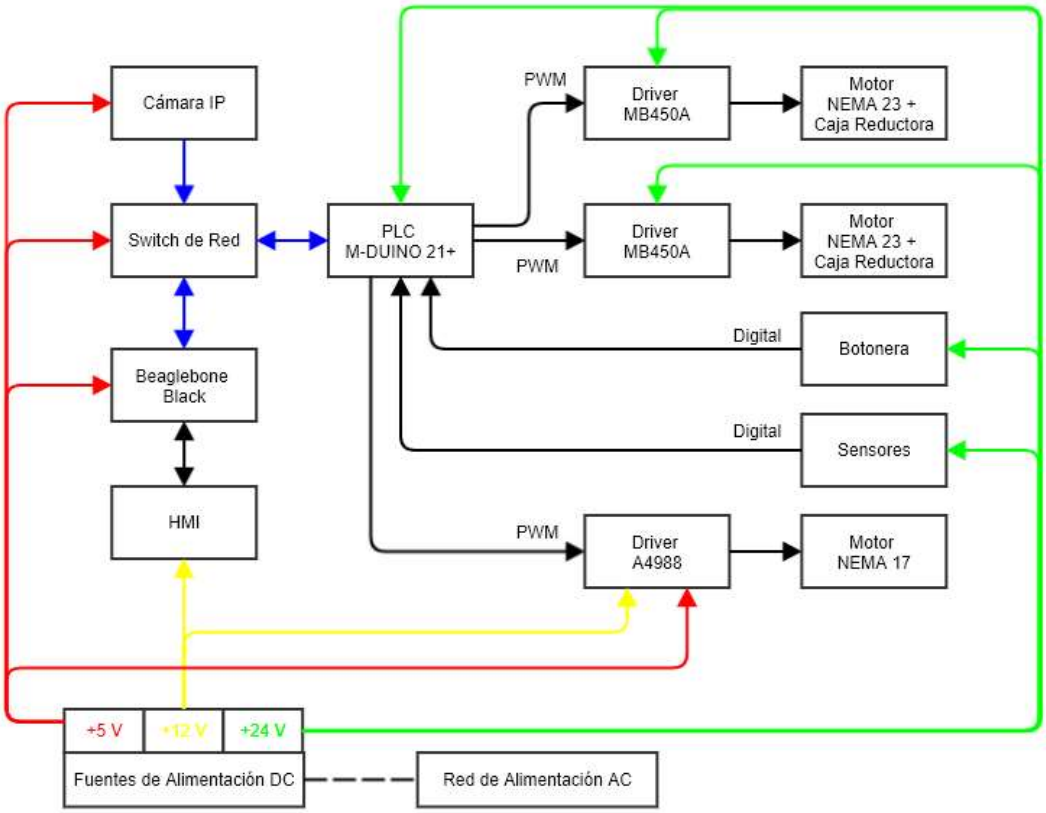


Figura 3.25 Diagrama General de Conexión.

3.2.1 SENSORES.

Los sensores a implementarse en el sistema son de tipo final de carrera mismos que marcarán los límites de operación y posiciones del sistema. La Tabla 3.9 presenta la disposición de sensores en el sistema, para comprender de mejor manera las posiciones que adoptará el sistema se presentan las Figuras 3.26 y 3.27.

Tabla 3.9 Disposición de Sensores.

Ubicación	Cantidad de Sensores	Propósito	Estado del Sensor	Significado
Estructura de Giro 1	4	Determinar sujeción del compartimento	Sensores 1-4 Activados	Compartimento Sujetado
	2	Determinar Posición	Sensor 5 Activado	Posición 1 = 0°
			Sensor 6 Activado	Posición 2 = 180°
Estructura de Giro 2	3	Determinar Posición	Sensor 7 Activado	Posición de Inicio 1 = 0°
			Sensor 8 Activado	Posición Final = 90°
			Sensor 9 Activado	Posición de Inicio 2 = 180°
Torre	1	Determinar posición e inicio de operación	Sensor 10 Activado	Compartimento elevado, Inicio de Operación
JIG de Soldadura	1	Determinar Posición	Sensor 11 Activado	Compartimento listo para ser liberarado
Total	11			

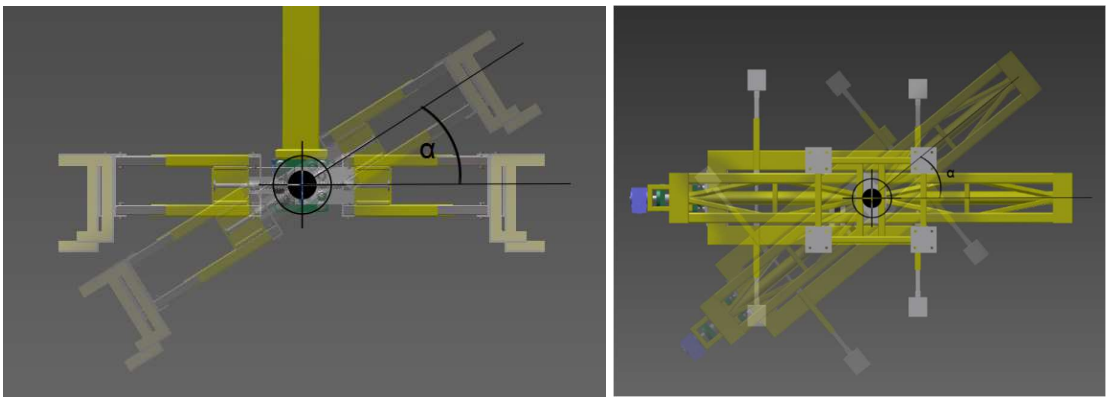


Figura 3.26 a) Movimiento de Estructura de Giro 1. b) Movimiento de Estructura de Giro 2.

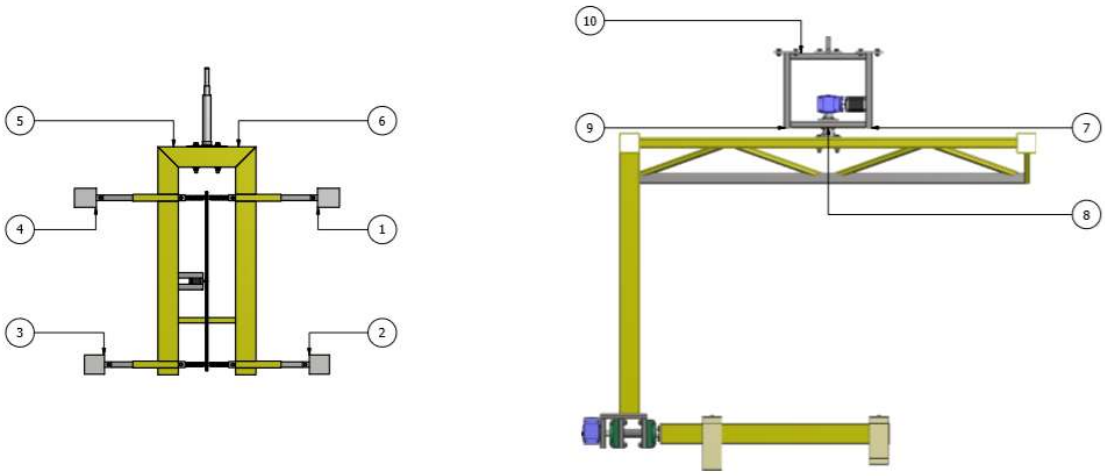


Figura 3.27 Ubicación de sensores en el sistema.

3.2.2 BOTONERA.

Para operar el sistema de volteo se cuenta con 2 botones de tipo pulsador y su función se detalla en la Tabla 3.10

Tabla 3.10 Descripción de Botones del Sistema.

Tipo de Botón	Función
Pulsador 1	Cierra el sistema de sujeción
Pulsador 2	Abre el sistema de sujeción
Paro de Emergencia	Detiene las operaciones del sistema

El inicio de los giros de posicionamiento tiene lugar después de presionar el “Pulsador 1”, de modo que este es el botón de inicio y cuando el “Sensor 10” ubicado en la torre se accione, el estar accionado este sensor indica que el compartimento se encuentra elevado y los giros pueden realizarse sin interrupciones, una vez finalizados los giros de posicionamiento, al presionarse el pulsador 2 se libera el compartimento únicamente si el sensor del JIG de soldadura está activado, lo que significa que es seguro liberar el compartimento, este botón viene a actuar como botón de finalización o paro, adicionalmente en caso de algún tipo de emergencia, el botón de paro de emergencia detiene todas las actividades de la máquina.

3.2.3 DRIVERS.

Para controlar el accionamiento y posición de motores a pasos como los NEMA 17 y NEMA 23 se emplean circuitos electrónicos denominados drivers, encargados de controlar el sentido de giro y los ángulos de giro del rotor, la entrada de estos drivers es un tren de pulsos, cada pulso es un paso o micro paso que el motor gira. Los datos técnicos del driver MB450A y A4988 se encuentran en los Anexos B.4 y B.5 respectivamente, el consumo de corriente del driver MB450A se puede seleccionar en base al motor que se utiliza, para este caso se requiere de 3 A para el funcionamiento del motor, de modo que el driver está configurado para consumir 3.2 A. En el caso del driver A4988 su consumo de polarización es de 0.3 A. y entregará una corriente de 1.1 A para el funcionamiento del motor NEMA 17.

3.2.4 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.

Para seleccionar la fuente de alimentación se toma en cuenta la corriente que consume cada uno de los elementos electrónicos que esta va a alimentar. En la Tabla 3.11 se muestra el consumo de cada elemento del sistema.

Tabla 3.11 Consumo eléctrico de elementos.

Elemento	Cantidad	Voltaje [V]	Corriente [A]	Total [A]
Beaglebone Black	1	5	1	3,8
Cámara IP	1	5	2	
Switch de red	1	5	0,5	
Driver A4988	1	5	0,3	
HMI	1	12	1,5	2,6
Motor Nema 17	1	12	1,1	
PLC	1	24	1,5	7,5
Driver MB450A	2	24	3	

Para asegurar tanto a la fuente de alimentación como a los elementos que estas proveen energía se recomienda que las fuentes de alimentación entreguen un máximo del 80% de su corriente nominal, para esto en la Tabla 3.12 se presenta las que las fuentes utilizarse deben cumplir.

Tabla 3.12 Características de Fuentes de Alimentación.

Fuente [V]	Corriente Nominal [A]	80% de Corriente Nominal [A]	Potencia [W]
5	5	4	25
12	5	4	60
24	10	8	240
Total			325

3.2.4.1 Protecciones Eléctricas

Adicional a las protecciones internas que poseen las fuentes de alimentación se coloca un fusible a manera de seguridad externa. Según [40] la corriente de diseño de fusibles se obtiene con la ecuación (3.44) para redes monofásicas.

$$I = \frac{W}{U * Cos\varphi} \tag{3.44}$$

Donde:

- I: Corriente de entrada, RMS.
- W: Potencia requerida.
- U: Voltaje de red, RMS.
- $Cos\varphi$: Factor de potencia.

Se considera la potencia total obtenida en la Tabla 3.12, $W = 325\,W$, el factor de potencia se asume como $Cos\varphi = 1$ y el voltaje de red $U = 110\,V$, reemplazando los datos en la ecuación (3.44) se obtiene:

$$I = \frac{325}{110 * 1} = 2.954\ A$$

La corriente que debe soportar el fusible se denomina corriente pico y se obtiene mediante la ecuación (3.45).

$$I_{pico} = \sqrt{2} * I \tag{3.45}$$

Reemplazando el valor de I en () se obtiene:

$$I_{pico} = \sqrt{2} * 2.954 = 4.178\ A$$

Con esto se determina la necesidad de un fusible de 4.2 A, este valor se ajusta a los valores comerciales y se requiere un fusible de 5 A.

3.2.5 DISEÑO DE PLACA ELECTRÓNICA

Para conectar y polarizar de manera correcta el driver A4988 es necesaria una placa electrónica de tipo PCB la cual simplificará la conexión de este módulo hacia el PLC, el diseño de sus componentes se presenta a continuación en la Figura 3.28.

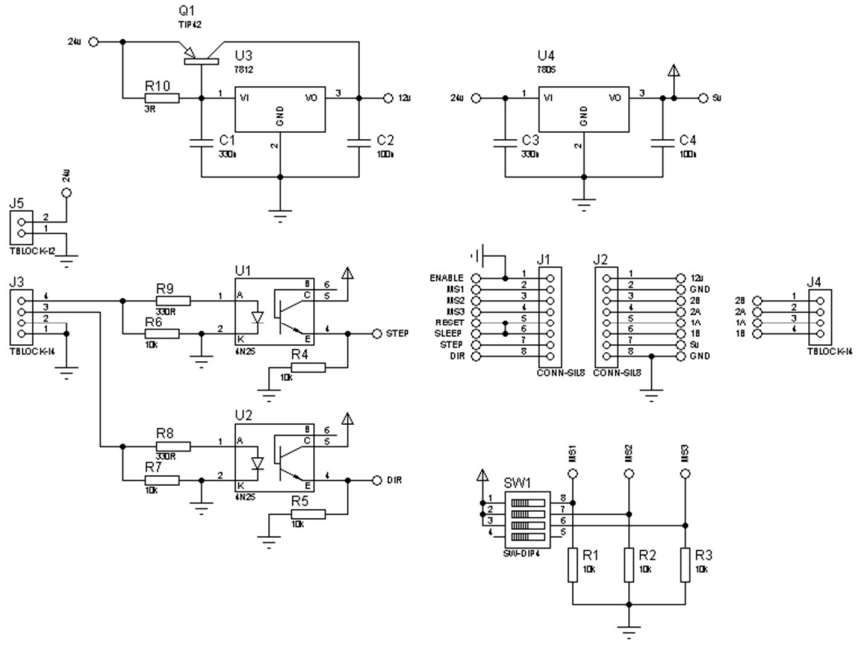


Figura 3.28 Circuito para Driver A4988.

El circuito impreso se presenta en el Anexo B.6

3.2.6 SELECCIÓN DE PLC

El PLC seleccionado es un M-Duino 21+ Ethernet, que dispone de 13 entradas (6 Análogo/Digitales y 7 Digitales) y 8 salidas de tipo transistor (3 Analógicas/Digitales y

5 Digitales). El PLC se seleccionó en base al requerimiento de 3 salidas de tipo PWM destinadas a controlar los motores a pasos, este PLC posee 3 salidas capaces de manejar PWM. Otro requerimiento importante al momento de la selección fue el número de entradas a ocuparse que para este caso se enlistan a continuación:

- 3 entradas para botonera (Pulsador 1, Pulsador 2, Paro de Emergencia).
- 7 entradas para sensores de tipo final de carrera,

Dando esto un total de 10 entradas digitales.

3.2.7 Interfaz de Operación del HMI.

El diseño de la Interfaz para el manejo del sistema consta de dos pantallas que se muestran en las Figuras 3.29 y 3.30. Dentro de la pantalla principal se puede observar los estados de conexión tanto del PLC como de la Cámara IP dentro del recuadro de conexiones, debajo de este se encuentra el área de Imagen donde se presenta la imagen que el sistema tomó para realizar el siguiente posicionamiento, al lado izquierdo está ubicado el botón “CONFIRMAR”, el cual es utilizado para advertir al sistema que hay un pallet listo para ser analizado.

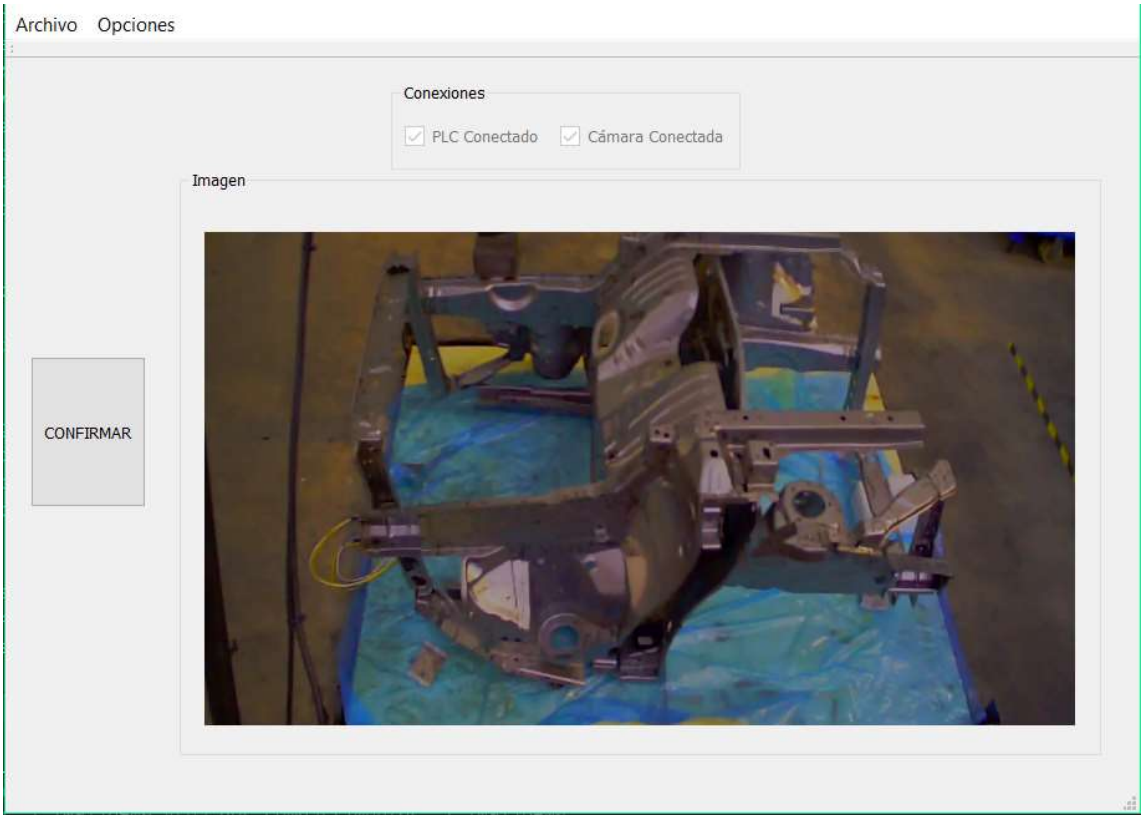


Figura 3.29 Pantalla Principal.

En la barra de tareas de la pantalla principal se encuentran dos pestañas, Archivo y Opciones, al desplegar Archivo se presenta un botón para salir del programa y al desplegar Opciones se presenta un botón para acceder a la ventana de calibración.

Para la ventana de calibración se dispone de un teclado numérico en pantalla para ingresar el valor en grados que se desea mover cada uno de los motores (Motor 1 para el Mecanismo de Giro 1 y Motor 2 para el Mecanismo de Giro 2). Si existe algún error al digitar la posición, se puede borrar lo ingresado pulsando el botón Limpiar. Una vez seleccionado el motor a calibrar y cuantos grados se lo desea mover, se selecciona la dirección de giro, en ese instante el motor seleccionado empezará a moverse hasta llegar a la posición deseada.

Figura 3.30 Ventana de Calibración.

3.2.8 CONEXIONES

Para realizar las conexiones entre PLC, drivers, placa electrónica y fuentes de alimentación es necesario determinar el calibre o tamaño de cable a utilizarse, estas dimensiones están normadas por la AWG.

La corriente más alta que circulará es de 3 A, de modo que, del Anexo B.7, se selecciona el cable AWG 16.

3.3 ALGORITMOS DE CONTROL.

A continuación, se presentan los algoritmos necesarios para realizar la programación del control para el sistema de volteo de compartimento de motor.

3.3.1 ALGORITMO GENERAL DE CONTROL.

La Figura 3.31 presenta el diagrama de flujo del funcionamiento global del sistema.

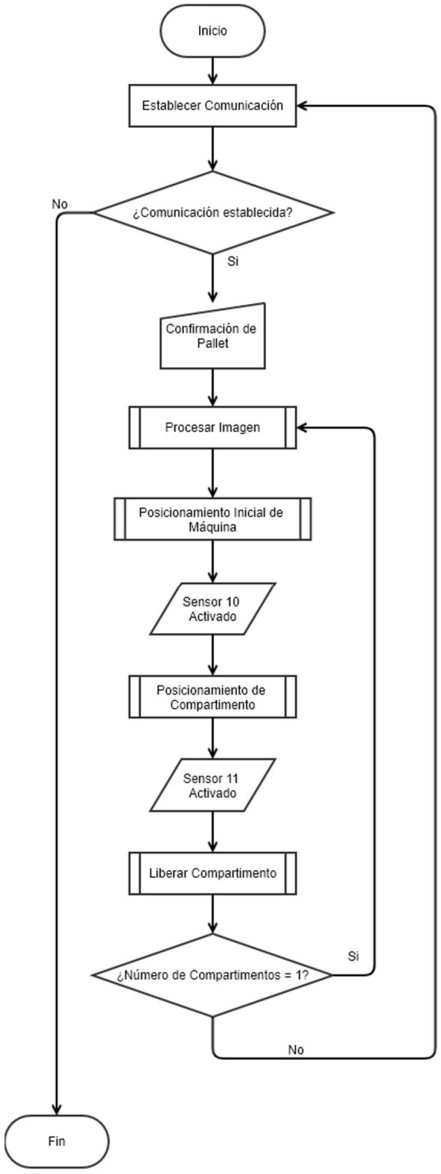


Figura 3.31 Algoritmo General de Control.

Inicia con establecer comunicación TCP/IP entre el PLC y la tarjeta Beaglebone Black, una vez establecida, espera por la confirmación del operador sobre la existencia de un pallet con compartimentos de motor, mediante el HMI, el sistema inicia el

procesamiento de imagen, con el resultado del procesamiento el sistema se ubica en la posición inicial de acuerdo a la posición del compartimento a manipular, en este punto se espera la orden del operador para sujetar el compartimento de motor, pulsando el Pulsador 1. Cuando el compartimento ha sido sujetado y el operador haya elevado el sistema, y este llegue a su nivel más alto se da inicio al posicionamiento del compartimento en el JIG de soldadura. El sistema es elevado por el operador debido a que el tecle que se dispone para esta tarea no dispone de periféricos que permitan el control del mismo mediante un PLC e intervenir el circuito de control propio del tecle podría ocasionar daños al equipo y anular la garantía del mismo. Una vez esté en posición se libera el compartimento de motor y se repite el ciclo de operación.

3.3.2 PROCESAMIENTO DE IMAGEN.

La Figura 3.32 presenta el diagrama de flujo para el procesamiento de imágenes del sistema.

Parte de la obtención de una imagen a color por medio de la cámara IP y presenta esta imagen al operador. La imagen a color se transforma a escala de grises, pasa por un filtro de difuminado para posteriormente convertirse en imagen binaria, una imagen binaria es aquella en la que únicamente existen píxeles blancos o negros. Después de este proceso se calcula el área blanca de la imagen para determinar la presencia de dos o un compartimento de motor e indicar al PLC que posición debe adoptar la máquina para la sujeción del componente y que movimientos debe realizar para ubicarlo en el JIG de soldadura.

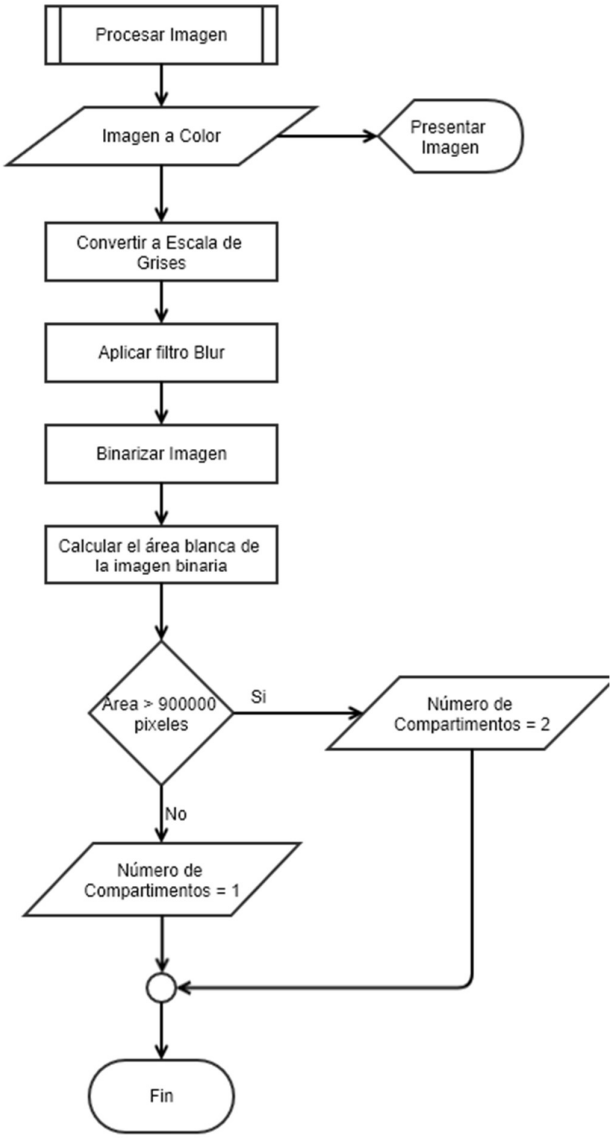


Figura 3.32 Algoritmo de procesamiento de Imagen.

3.3.3 POSICIONAMIENTO INICIAL DE MÁQUINA.

Las Figuras 3.33 y 3.34 presentan el diagrama de flujo para el posicionamiento inicial del sistema.

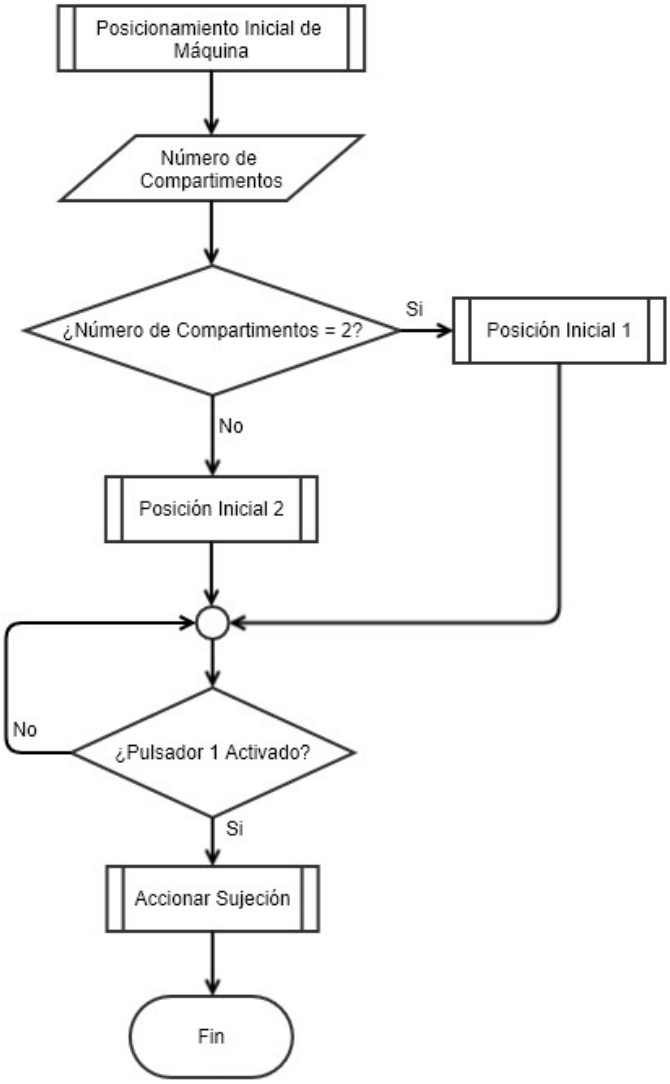


Figura 3.33 Algoritmo de Posicionamiento Inicial.

El PLC recibe el número de compartimentos de motor que el algoritmo de visión artificial detecto, si se detectó un compartimento se ejecuta la rutina “Posición Inicial 1”, caso contrario se ejecuta la rutina “Posición Inicial 2”, estas rutinas accionan los motores y ubican a la máquina en la posición inicial en la cual se tomará el compartimento de motor. Una vez la máquina se haya ubicado y el operador haya pulsado el botón de Inicio/Sujeción, se da inicio al proceso de sujeción del compartimento.

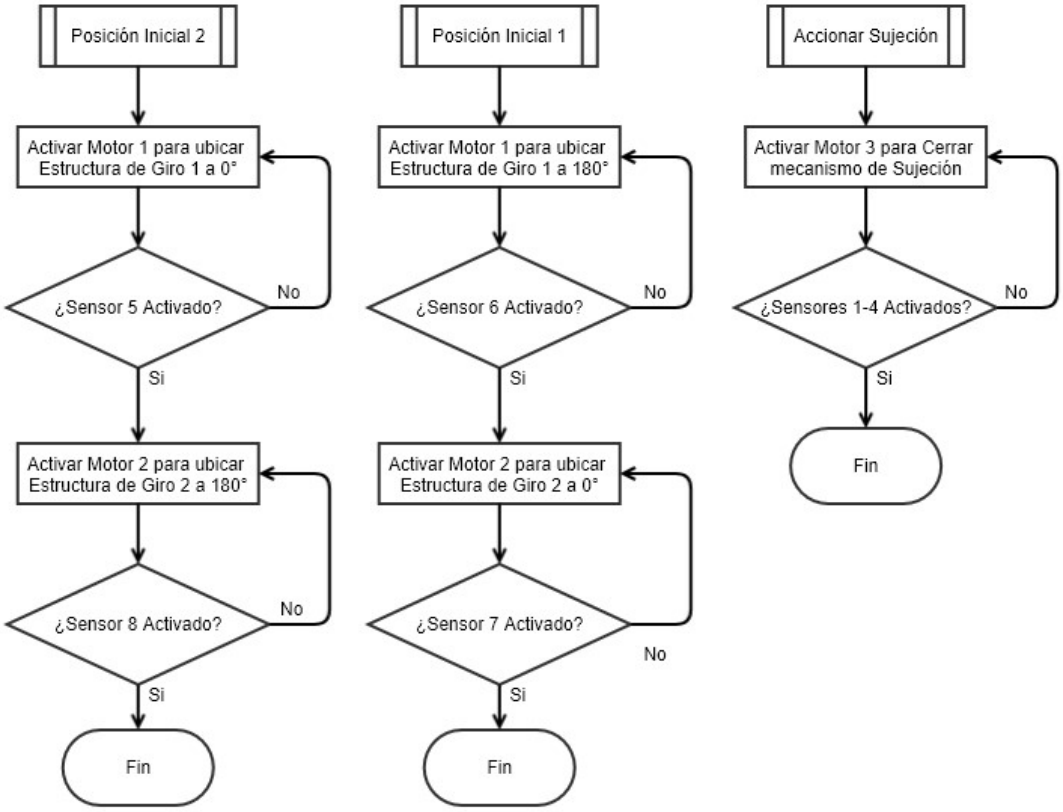


Figura 3.34 Procesos predefinidos de Posicionamiento Inicial.

3.3.4 POSICIONAMIENTO DE COMPARTIMENTO.

La Figura 3.35 presenta el diagrama de flujo para el posicionamiento del compartimento de motor, iniciando con la llegada del sistema a su posición más alta, en este punto se activan los motores para ubicar el sistema en la posición de entrega, una vez posicionado el operador baja el sistema hasta el JIG de soldadura y se procede a la liberación del compartimento.

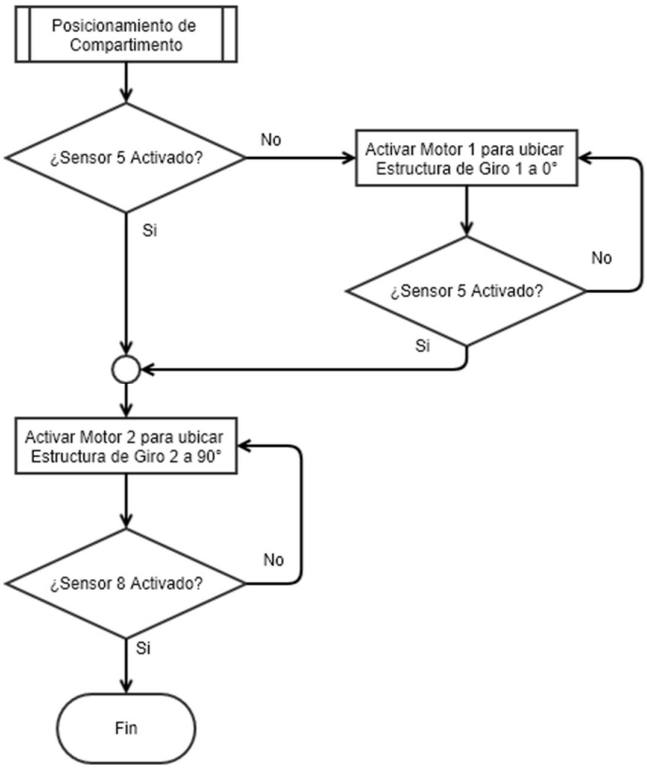


Figura 3.35 Algoritmo de Posicionamiento de Compartimento.

3.3.5 LIBERACIÓN DE COMPARTIMENTO.

La Figura 3.36 presenta el diagrama de flujo para la liberación del compartimento de motor.

Figura 3.36 Algoritmo de liberación de compartimento.

CAPITULO IV

IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

4.1 CONSTRUCCIÓN.

La construcción del sistema de volteo para compartimento de motor, ilustrado en la Figura 3.1, se fraccionó en varios sub-módulos estructurales para simplificar el ensamblaje final del mismo. La estructura del sistema consta de los siguientes sub-módulos:

- Estructura de Giro 1.
- Estructura de Giro 2.
- Estructura Suspendida.
- Extensión Torre.
- Torre.
- Soporte KBK.

4.1.1 CONSTRUCCIÓN DE MECANISMO DE GIRO 1.

La Figura 4.1 ilustra el diagrama de proceso para la construcción del mecanismo de giro 1, los materiales a utilizarse se listan a continuación:

- Tubería estructural cuadrada de 75 x 75 x 4 mm de acero ASTM-A500.
- Tubería estructural cuadrada de 25 x 25 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Tubería estructural cuadrada de 20 x 20 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Platinas de 20 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Tornillos de potencia con rosca derecha e izquierda.
- Piñones de 15 dientes.
- Rodamientos 608.
- Eje de 30 mm de acero AISI-4337

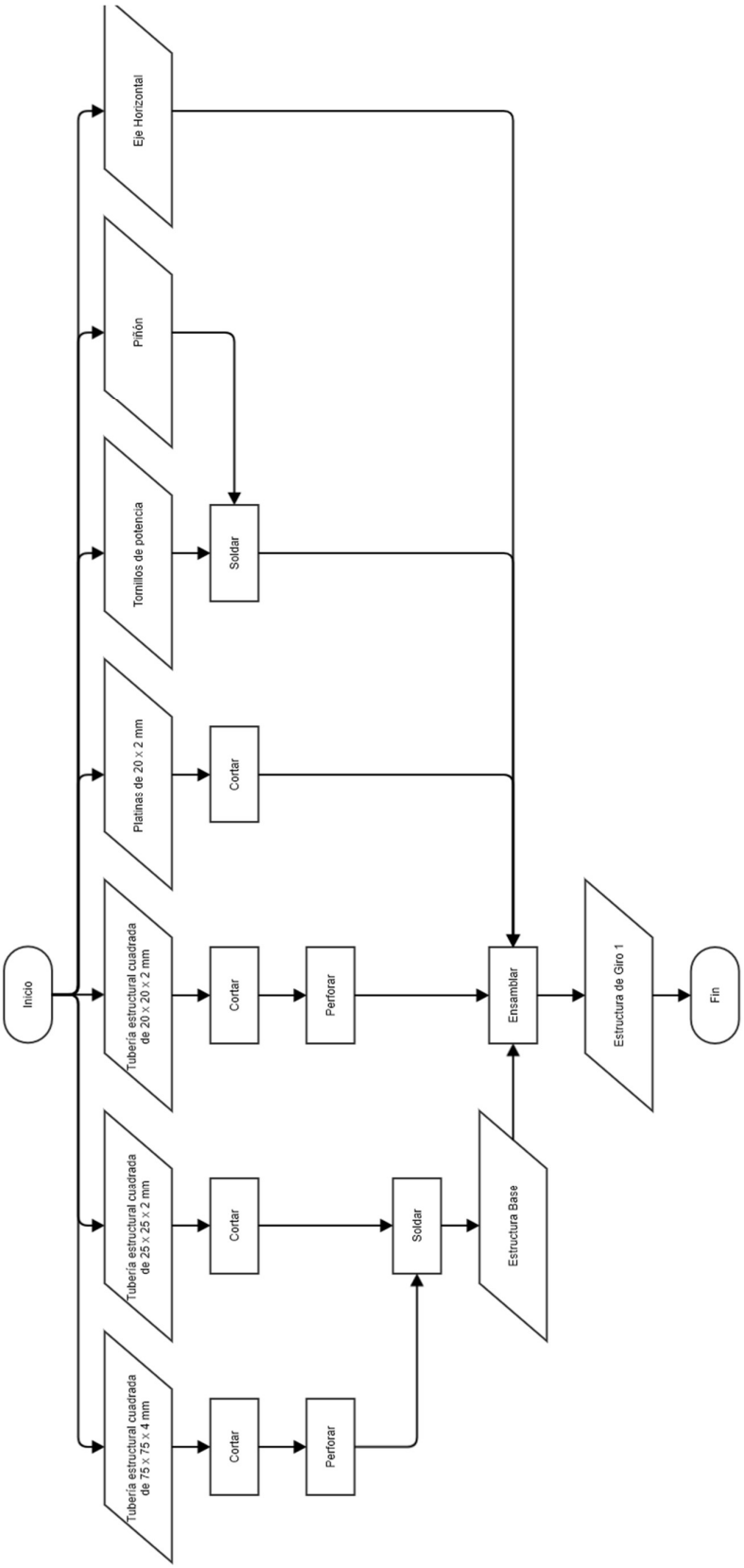


Figura 4.1 Diagrama de proceso de construcción de Mecanismo de Giro 1.

4.1.2 CONSTRUCCIÓN DE MECANISMO DE GIRO 2.

La Figura 4.2 ilustra el diagrama de proceso para la construcción del mecanismo de giro 2, los materiales a utilizarse se listan a continuación:

- Tubería estructural cuadrada de 75 x 75 x 4 mm de acero ASTM-A500.
- Tubería estructural cuadrada de 40 x 40 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Tubería estructural cuadrada de 20 x 20 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Placa de 190 x 95 x 4 mm de acero ASTM-A.
- Chumaceras F206 con rodamiento 56206.
- Motor NEMA 23 con caja reductora.
- Bocín de 40 mm diámetro externo, 25 mm diámetro interno.

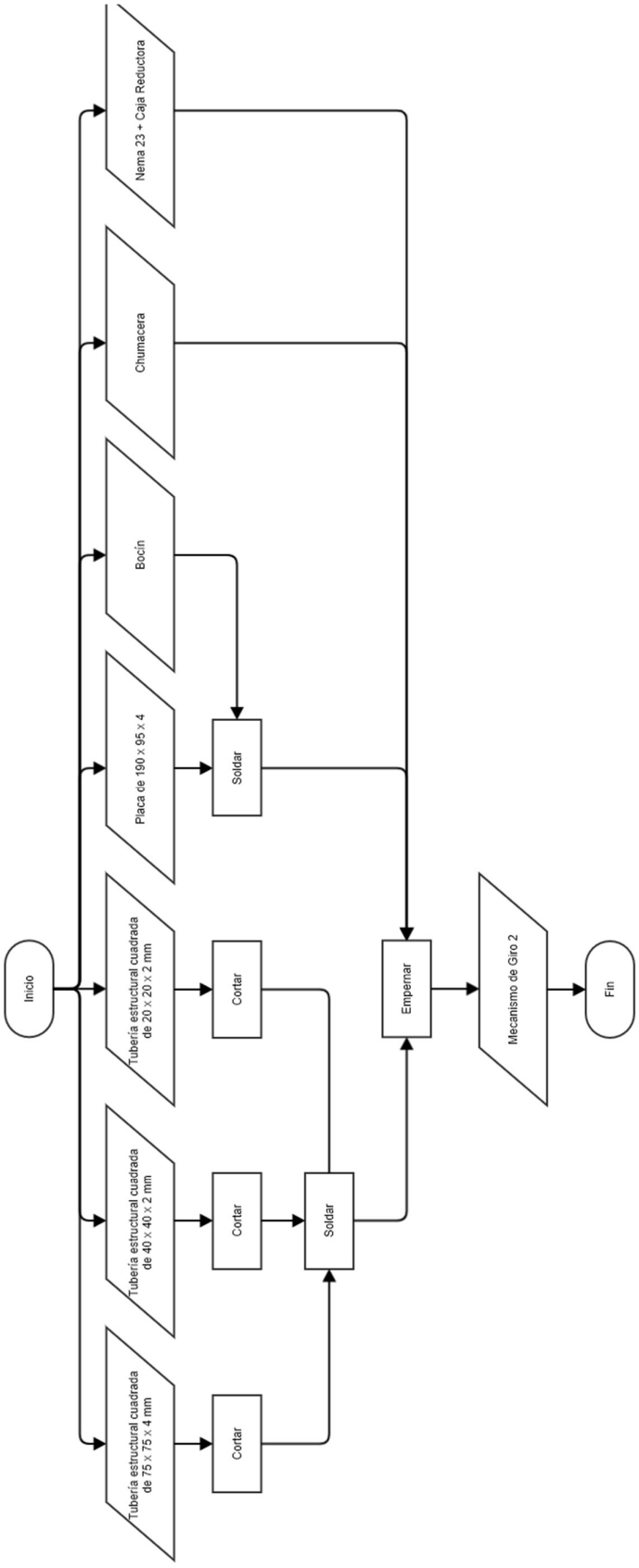


Figura 4.2 Diagrama de proceso de construcción de Mecanismo de Giro 2.

4.1.3 CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA SUSPENDIDA.

La Figura 4.3 ilustra el diagrama de proceso para la construcción de la estructura suspendida, los materiales a utilizarse se listan a continuación:

- Tubería estructural cuadrada de 25 x 25 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Placas de 100 x 100 x 4 mm de acero ASTM-A
- Placas de 116 x 75 x 4 mm de acero ASTM-A.
- Eje 25 mm de acero ASIS-4337.
- Rodamiento 51105.
- Motor NEMA 23 con caja reductora.

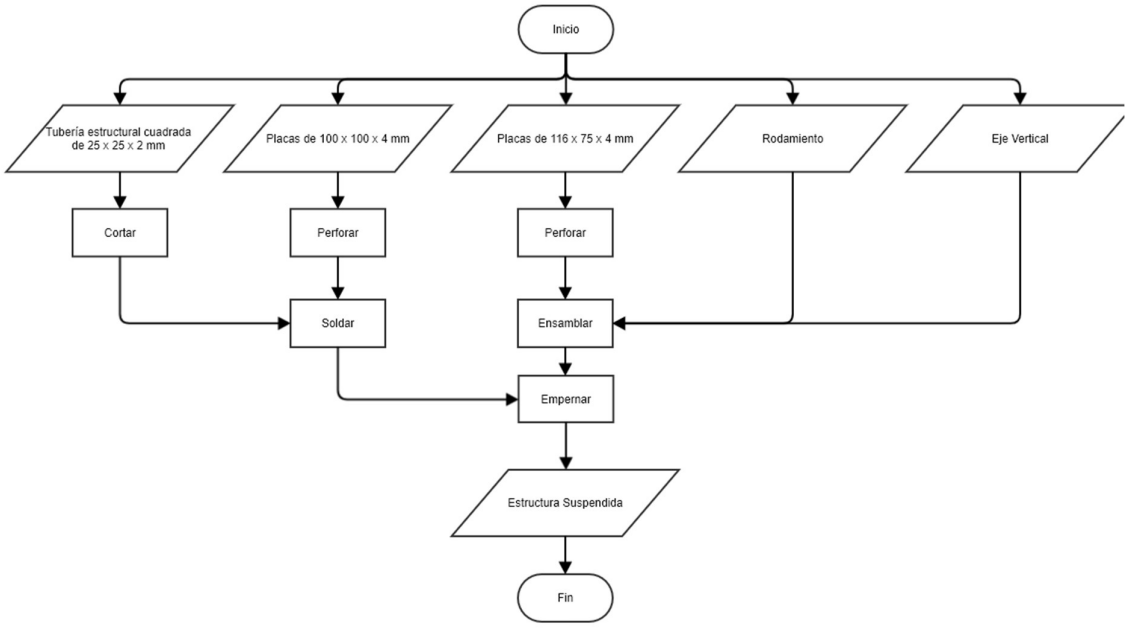


Figura 4.3 Diagrama de proceso de construcción de Estructura Suspendida.

4.1.4 CONSTRUCCIÓN DE EXTENSIÓN TORRE.

La Figura 4.4 ilustra el diagrama de proceso para la construcción de las extensiones de torre, los materiales a utilizarse se listan a continuación:

- Tubería estructural redonda de 42 x 4 mm de acero ASTM-A500.
- Placas de 100 x 100 x 4 mm de acero ASTM-A.

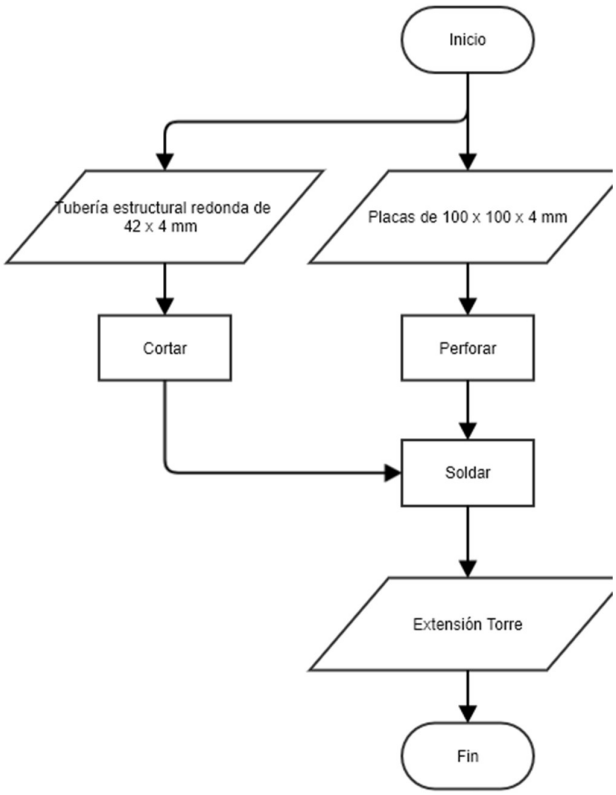


Figura 4.4 Diagrama de proceso de construcción de Extension Torre.

4.1.5 CONSTRUCCIÓN TORRE.

La Figura 4.5 ilustra el diagrama de proceso para la construcción de la torre, los materiales a utilizarse se listan a continuación:

- Tubería estructural redonda de 50 x 4 mm de acero ASTM-A500.
- Tubería estructural cuadrada de 20 x 20 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Placas de 100 x 100 x 4 mm de acero ASTM-A.

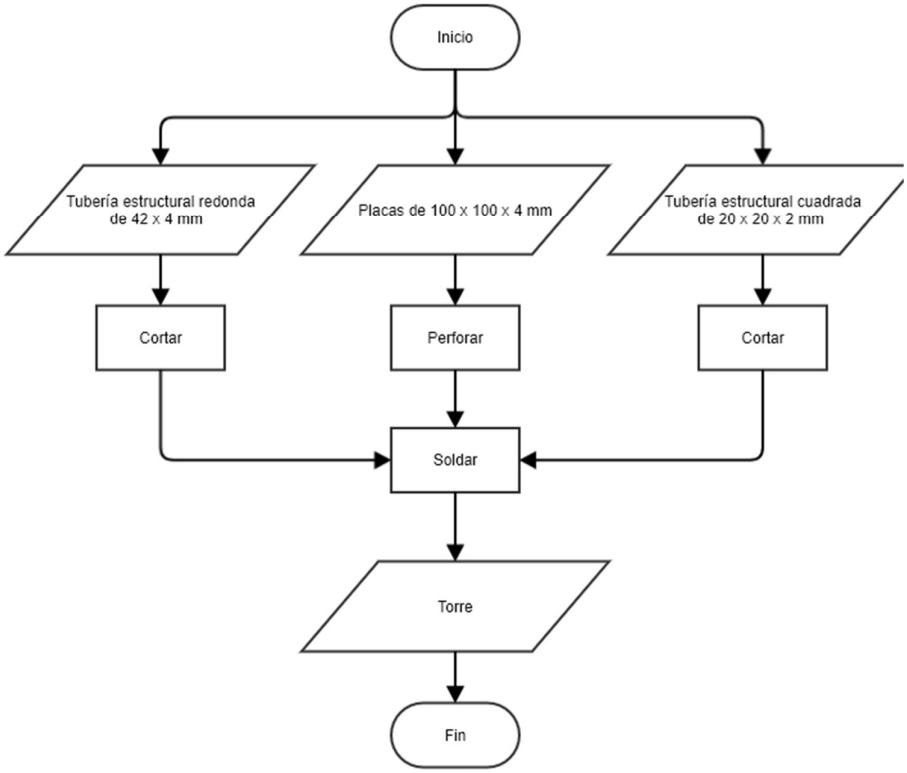


Figura 4.5 Diagrama de proceso de construcción de Torre.

4.1.6 CONSTRUCCIÓN DE SOPORTE KBK.

La Figura 4.6 ilustra el diagrama de proceso para la construcción del soporte para tecle, los materiales a utilizarse se listan a continuación:

- Tubería estructural rectangular de 60 x 30 x 2 mm de acero ASTM-A500.
- Tubería estructural cuadrada de 50 x 50 x 3 mm de acero ASTM-A500.
- Placas de 100 x 100 x 4 mm de acero ASTM-A.

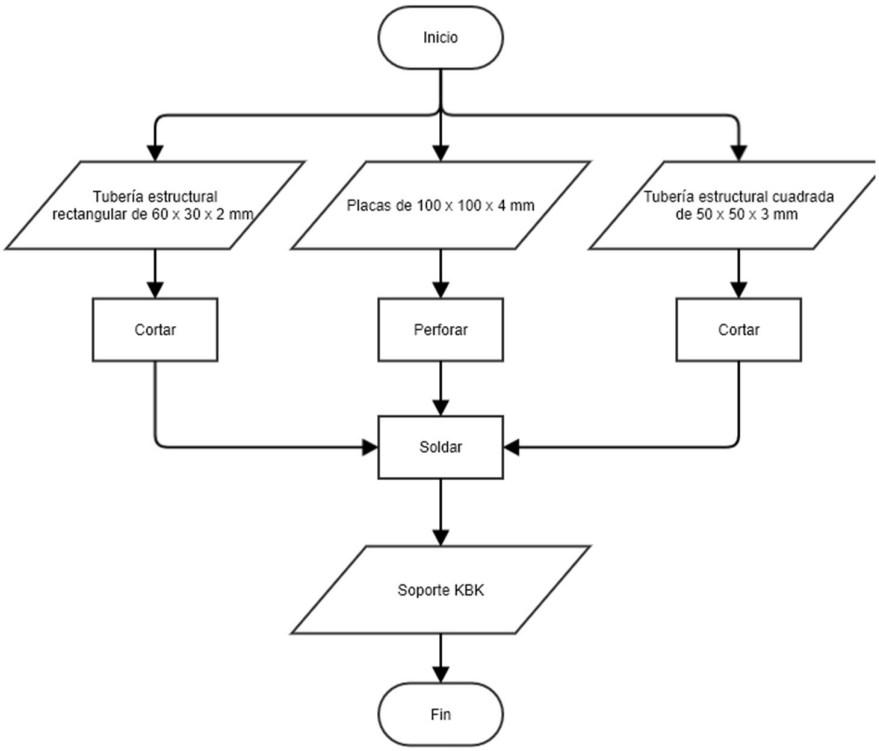


Figura 4.6 Diagrama de proceso de construcción de Soporte KBK.

4.2 PRUEBAS Y RESULTADOS.

Las etapas de pruebas realizadas al sistema de volteo para compartimento de motor se dividen en 2 grupos:

- Pruebas de algoritmo de visión.
- Pruebas de operación.

4.2.1 PRUEBAS DE ALGORITMO DE VISIÓN.

La primera etapa de pruebas se realizó con el sistema informático de la máquina en un día de producción para de este modo verificar si los parámetros del algoritmo de visión entrega como resultado la decisión correcta de como manipular el compartimento de motor correspondiente. A lo largo de dos días de producción se tomó 30 pruebas (30 imágenes), lo que implica que en la mitad de estas contienen un solo compartimento de motor. La Tabla 4.1 presenta los datos que arroja el tratamiento de imágenes.

Tabla 4.1 Datos de análisis de Imagenes.

Prueba #	Compartimentos en la Imagen	Área de pixeles ($x10^5$)	Compartimentos identificados
1	1	8,75	1
2	2	10,47	2
3	1	7,6	1
4	2	11,58	2
5	1	4,05	1
6	2	9,47	2
7	1	5,58	1
8	2	9,62	2
9	1	5,77	1
10	2	10,01	2
11	1	6,66	1
12	2	10,66	2
13	1	6,89	1
14	2	11,32	2
15	1	7,51	1
16	2	11,87	2
17	1	4,6	1
18	2	11,01	2
19	1	5,19	1
20	2	10,33	2
21	1	8,86	1
22	2	9,98	2
23	1	7,43	1
24	2	10,49	2
25	1	7,33	1
26	2	11,38	2
27	1	6,45	1
28	2	10,79	2
29	1	6,02	1
30	2	10,03	2

Las Figuras 4.7 y 4.8 presentan las cartas de control correspondientes al tratamiento de imágenes que realiza el sistema de control.

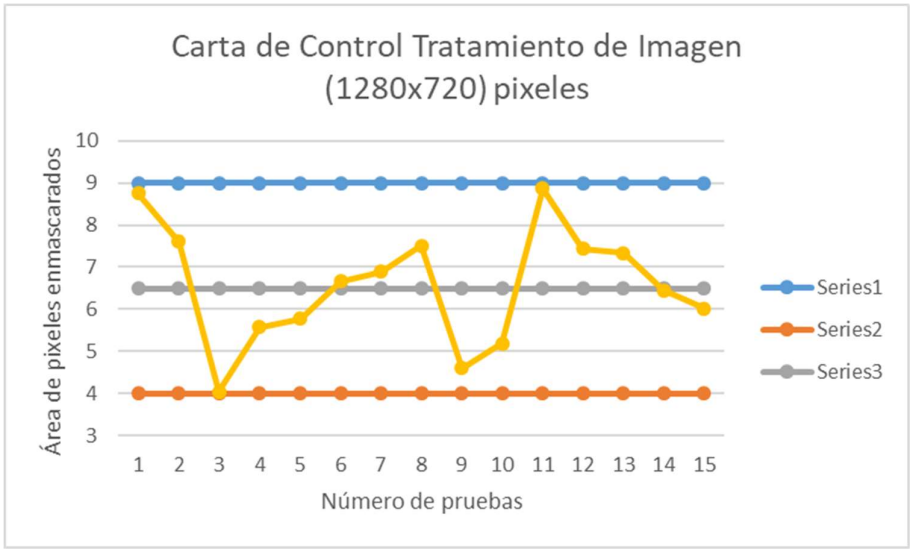


Figura 4.7 Carta de Control de Tratamiendo de Imagen para Imágenes que contengan un Compartiemento de Motor.

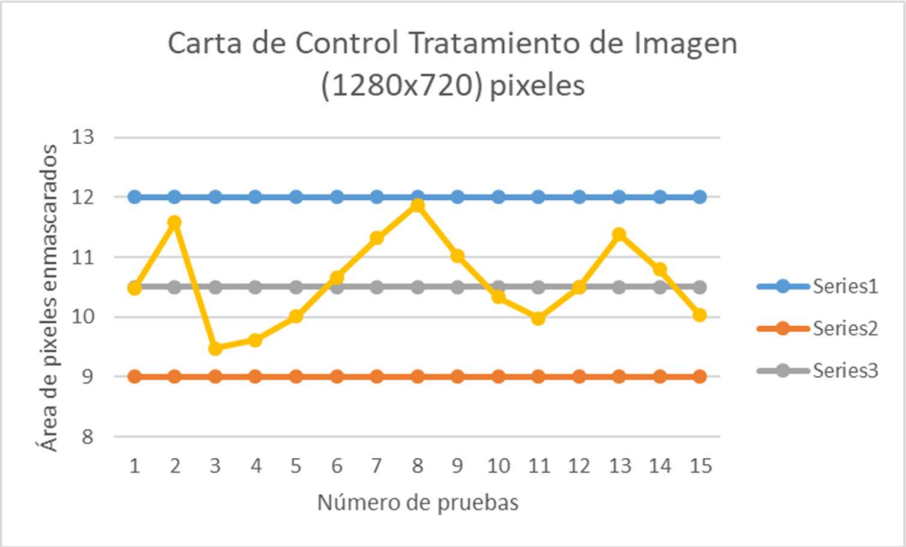


Figura 4.8 Carta de Control de Tratamiendo de Imagen para Imágenes que contengan dos Compartiemento de Motor.

4.2.1.1 Resultados

Como resultado de las pruebas del algoritmo de visión artificial mediante el análisis de las cartas de control, se establece que el proceso es controlado. Cabe destacar que no se obtuvo errores durante el tratamiento de la imagen y el algoritmo es capaz de identificar los casos en los que hay uno o dos compartimentos de motor.

4.2.2 PRUEBAS DE OPERACIÓN.

La segunda etapa de pruebas se realizó en base al tiempo de operación del sistema, para esto se divide esta sección en dos partes, la primera correspondiente al tiempo de volteo, los resultados se presentan en la Tabla 4.2.

Y la segunda correspondiente al tiempo de posicionamiento, los resultados de las pruebas se presentan en la Tabla 4.3.

En la Figura 4.9 se presentan la carta de control para el volteo de los compartimentos de motor

Y la Figura 4.10 presenta la carta de control para el Giro de posicionamiento.

Tabla 4.2 Datos de Tiempo de Giro de Volteo (Giro al rededor de X).

Prueba #	Tiempo de Volteo	Tiempo Esperado
1	10	10
2	10,1	10
3	10	10
4	10,2	10
5	9,9	10
6	10	10
7	10,1	10
8	10	10
9	10	10
10	9,9	10
11	10	10
12	9,9	10
13	9,7	10
14	9,8	10
15	10	10

Tabla 4.3 Datos de Tiempo de Giro de Posicionamiento (Giro al rededor de Y).

Prueba #	Tiempo de Posicionamiento	Tiempo Esperado
1	9,8	10
2	10	10
3	10,1	10
4	10	10
5	9,9	10
6	9,9	10
7	10,2	10
8	10,3	10
9	10,1	10
10	10	10
11	9,9	10
12	9,9	10
13	9,8	10
14	9,9	10
15	9,8	10

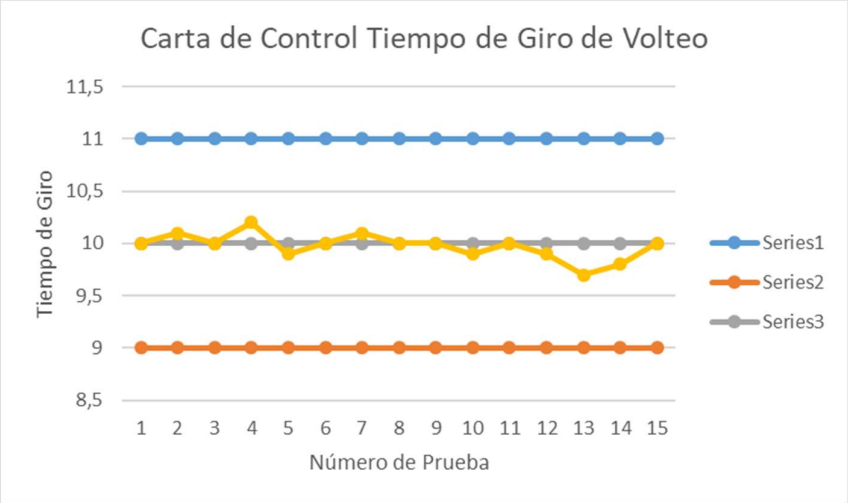


Figura 4.9 Carta de Control de Tiempo de Giro de Volteo.

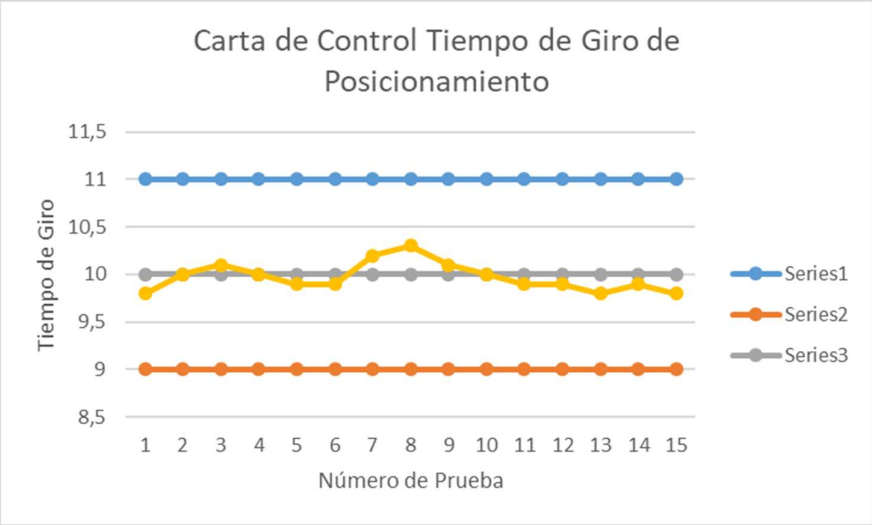


Figura 4.10 Carta de Control de Tiempo de Giro de Posicionamiento.

4.2.2.1 Resultados

Como resultado de las pruebas de operación mediante el análisis de las cartas de control, se establece que el proceso es controlado. Cabe destacar que las velocidades de giro se controlan mediante rampas de aceleración y desaceleración, esto se debe a que a menor velocidad el torque del motor se acerca a su valor nominal, mientras aumenta la velocidad el par disminuye. Es necesario aprovechar el máximo torque del motor al iniciar los movimientos para de esta manera vencer la inercia del componente a girar, y de igual manera para detener el movimiento es muy recomendable disminuir gradualmente la velocidad para evitar que la propia inercia de giro dañe tanto al motor como la caja reductora.

CONCLUSIONES

Analizados los resultados del “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE VOLTEO PARA EL COMPARTIMIENTO DE MOTOR PARA LA LÍNEA DE ENSAMBLAJE DEL VEHÍCULO MODELO M4 PARA LA EMPRESA CIAUTO”, se establecen las siguientes conclusiones:

1. El sistema de volteo para compartimento de motor diseñado se lo cataloga como una máquina semiautomática de asistencia para el manejo de cargas de peso mediano.
2. El tiempo del proceso de volteo y posicionamiento del compartimento de motor se redujo un 5% aproximadamente.
3. El diseño del chasis bajo el criterio de rigidez permite que la estructura trabaje sin problemas bajo el efecto de carga y descarga, además en caso de una sobrecarga la estructura no presentará daños o deformaciones permanentes, el sistema trabaja a un 90% de su capacidad.
4. El filtro de difuminado implementado como parte del pre-procesamiento de imagen permite disminuir el efecto del reflejo de la luz sobre el fondo plástico del pallet, esto permite que al momento de obtener el área que ocupa el o los compartimentos dentro de la imagen estas pequeñas perturbaciones luminosas se desprecien e incluso se eliminen.
5. Después de haber sido realizadas las pruebas de funcionamiento a lo largo de una jornada laboral a partir de las 7h30 hasta las 15h30, el porcentaje de eficiencia del algoritmo de reconocimiento es de 93%, esto puede verse afectado por las condiciones de luminosidad.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda lubricar las guías de la torre por lo menos una vez por semana debido a que estos elementos son los que permiten el desplazamiento vertical de toda la máquina.
2. Es importante que al momento de encender la máquina primero se energice el manipulador y a continuación el HMI.
3. En el caso de una interrupción en el funcionamiento de la máquina, ya sea este por decisión del usuario por medio del botón de paro o por una baja de tensión, el posicionamiento de la máquina se lo puede hacer mediante la ventana de calibración.
4. Al final de la jornada laboral para apagar el equipo, el HMI debe ser apagado por medio del botón de apagado ubicado en la interfaz gráfica y cuando la pantalla se encuentre en negro, apagar el switch de poder.
5. En caso de una falla en el posicionamiento debido al reconocimiento por visión artificial, se recomienda cerrar el programa en el HMI y manipular la máquina por medio de la botonera de mando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Diariomotor, «DIARIOMOTOR,» 29 Octubre 2013. [En línea]. Available: http://www.diariomotor.com/2013/10/29/hyundai-nos-ensena-como-se-ensambla-un-automovil-desde-el-mineral-de-hierro-hasta-su-primer-arranque/. [Último acceso: 05 Abril 2017].

[2] Renault, «Renault,» 2017. [En línea]. Available: https://www.renault.com.co/descubre-renault/renault-en-colombia/proceso-de-produccion.html#. [Último acceso: 05 Abril 2017].

[3] de *Manual de la Técnica del Automóvil*, Tercera ed., Reverté, p. 312.

[4] GM OBB Ecuador, «GM OBB,» 2015. [En línea]. Available: https://www.gmobb.ec/produccion-y-tecnologia/. [Último acceso: 05 Abril 2017].

[5] «El Mercurio,» 05 08 2016. [En línea]. Available: https://www.elmercurio.com.ec/546634-grupo-eljuri-tiene-procesos-robotizados-para-ensamblar/#.WA_mjvrhBEY. [Último acceso: 25 10 2016].

[6] Líderes, «Líderes,» 16 Febrero 2015. [En línea]. Available: http://www.revistalideres.ec/lideres/ciauto-modelo-ecuador-ambato.html. [Último acceso: 05 Abril 2017].

[7] M. Candiani, «El Financiero,» Grupo Multimedia Lauman, SAPI de CV, 03 Octubre 2016. [En línea]. Available: http://www.elfinanciero.com.mx/opinion/audi-q5-de-san-jose-chiapa-para-el-mundo.html. [Último acceso: 20 Octubre 2016].

[8] Ait, «Ait,» 03 Marzo 2015. [En línea]. Available: https://www.ait.com.ar/blog/robotica-industria-automotriz. [Último acceso: 06 Abril 2017].

[9] Ait, «Ait,» 14 Marzo 2016. [En línea]. Available: https://www.ait.com.ar/es/blog/aplicacion-plc-industrias. [Último acceso: 06 Abril 2017].

[10] The Washington Post, «The Washington Post,» 04 Agosto 2016. [En línea]. Available: https://www.washingtonpost.com/news/the-switch/wp/2016/08/04/the-future-of-car-production-will-be-devoid-of-people-according-to-tesla/?tid=sm_tw&utm_term=.c27450df6227. [Último acceso: 06 Abril 2017].

[11] Ait, «Ait,» 04 Agosto 2016. [En línea]. Available: https://www.ait.com.ar/es/blog/tesla-planea-fabricas-puramente-autonomas. [Último acceso: 06 Abril 2017].

[12] Direct Industry, «Direct Industry,» 2018. [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/dalmec/product-13956-1886742.html. [Último acceso: 8 Mayo 2018].

[13] incomimex, «incomimex,» Incomimex S.L, 2018. [En línea]. Available: https://www.incomimex.com/faq_details.php?id=33. [Último acceso: 8 Mayo 2018].

[14] C. Riba i Romeva, Diseño Concurrente, Barcelona: ETSEIB - UPC, 2002.

[15] Coolmay, «Coolmay,» 2018. [En línea]. Available: http://www.coolmay.net/Product_98-796-36-41.html. [Último acceso: 10 Junio 2018].

[16] Flexem, «Flexem,» 2018. [En línea]. Available: http://english.flexem.com/product-detail-9.html. [Último acceso: 10 Junio 2018].

[17] Orangepi, «OrangePi,» 2017. [En línea]. Available: http://www.orangepi.org/orangepizero/. [Último acceso: 08 Junio 2017].

[18] element14, «element14 COMMUNITY,» 2009. [En línea]. Available: https://www.element14.com/community/docs/DOC-78671/l/element14-beaglebone-black-industrial-4g#documents. [Último acceso: 18 Marzo 2017].

[19] RS Components, «RS Components,» [En línea]. Available: http://uk.rs-online.com/web/p/processor-microcontroller-development-kits/8968660/. [Último acceso: 18 Marzo 2017].

[20] Controllino, «Controllino,» 2018. [En línea]. Available: https://controllino.biz/controllino/maxi/. [Último acceso: 10 Junio 2018].

[21] Industrial Shields, «IndustrialShields,» Boot&Work Corp., S.L., [En línea]. Available: https://www.industrialshields.com/es/product/m-duino-plc-arduino-21-ios-analogdigital-plus/. [Último acceso: 10 Junio 2018].

[22] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, Quinta ed., México D.F.: McGraw-Hill, 2012.

[23] National Instruments, «National Instruments,» 2017. [En línea]. Available: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203938. [Último acceso: 01 Junio 2017].

[24] Direct Industry, «Direct Industry,» 2017. [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/moog/product-222-449658.html. [Último acceso: 02 Junio 2017].

[25] J. Roldán Viloria, «Servomotores,» de *Motores de corriente continua*, Madrid, Paraninfo, 2014, p. 257.

[26] Infaimon, «Infaimon Visión Artificial,» Infaimon, 2016. [En línea]. Available: http://www.infaimon.com/es/motionblitz-cube4. [Último acceso: 18 11 18].

[27] Direct Industry, «Direct Industry,» 2017. [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/cbc-europe-gmbh/product-60713-1825098.html. [Último acceso: 08 Junio 2017].

[28] Infaimon, «Infaimon,» 2017. [En línea]. Available: http://www.infaimon.com/es/cv-l107-cl. [Último acceso: 08 Junio 2017].

[29] SUYI GROUP, «SUYI GROUP,» 2017. [En línea]. Available: http://hg-instruments.com/7-5-limit-switch/219629. [Último acceso: 08 Junio 2017].

[30] Direct Industry, «Direct Industry,» 2017. [En línea]. Available: http://www.directindustry.es/prod/baumer-group/product-179-1790385.html. [Último acceso: 08 Junio 2017].

[31] J. Hyde, J. Regué y A. Cuspinera, «Sensores de Proximidad,» de *Control Electroneumático y Electrónico*, Barcelona, Norgren, 1997, pp. 82-83.

[32] R. L. Mott, «Flexiones de vigas,» de *Resistencia de Materiales*, Quinta ed., Naucalpan, Pearson Educación, 2009, pp. 452-495.

[33] R. L. Mott, «Esfuerzo cortante torsional y deformación torsional.,» de *Resistencia de Materiales*, Quinta ed., Naucalpan, Pearson Educación, 2009, pp. 185-231.

[34] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Fallas por fatiga resusltantes de carga variable,» de *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Octava ed., México D.F., McGraw-Hill, 2008, pp. 257-339.

[35] Ivan Bohman C.A., Catálogo de Productos, Tercera ed., Quito, 2017.

[36] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Tabla A-15,» de *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Octava ed., México D.F., McGraw-Hill, 2008, pp. 1006-1012.

[37] FAG, Rodamientos FAG, 2000 ed.

[38] R. G. Budynas y J. K. Nisbett , «Tornillos, sujetadores y diseño de uniones no permanentes,» de *Diseño en Ingeniería Mecanica de Shigley*, Octava ed., Mexico D.F., McGRAW-HILL, 2008, pp. 395-432.

[39] R. A. Serway y J. W. Jewett, «Fuerzas de Fricción,» de *Fisica para Ciencias e Ingeniería*, Septima ed., vol. I, S. R. Cervantes González, Ed., Mexico D.F., CENGAGE Learning, 2008, pp. 119-121.

[40] . A. Martínez Antón, V. Blanca Giménez, N. Castilla Cabanes y R. M. Pastor Villa, «Cálculo de fusibles de una instalación eléctrica en baja tensión».